

# Orthogonale Dreibeine in richtungsvollständigen, stetigen Geradenscharen des $R^3$ .

Autor(en): **Debrunner, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Commentarii Mathematici Helvetici**

Band (Jahr): **37 (1962-1963)**

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-28604>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Orthogonale Dreibeine in richtungsvollständigen, stetigen Geradenscharen des $R^3$

Von HANS DEBRUNNER, Bern

**1. Ergebnisse.** Es sei  $E$  die Menge der (nichtorientierten) Geraden des dreidimensionalen euklidischen Raumes  $R^3$ . Wie üblich, schreiben wir für eine Gerade  $g_0$  und eine Geradenfolge  $g_1, g_2, g_3, \dots$  genau dann  $\lim g_i = g_0$ , wenn irgend zwei verschiedene parallele Ebenen  $I'$  und  $I''$  des  $R^3$ , zu denen  $g_0$  nicht parallel liegt, von allen außer endlich vielen Geraden der Folge durchstoßen werden, und wenn für die Durchstoßpunkte  $P'_k = g_k \cap I'$  und  $P''_k = g_k \cap I''$  im euklidischen Sinne  $\lim P'_k = P'_0$  und  $\lim P''_k = P''_0$  gilt. Unter der Richtung einer Geraden  $g$  verstehen wir die zu  $g$  parallele Gerade  $\pi(g)$  durch den Ursprung  $0 \in R^3$ ; in diesem Sinne ist die Menge der Geradenrichtungen identisch mit dem Büschel  $B$  aller Geraden durch  $0$ .

Ordnen wir in stetiger Weise jeder Richtung  $b \in B$  eine zu  $b$  parallele Gerade  $\sigma(b)$  des  $R^3$  zu, so nennen wir die Bildmenge  $\Sigma = \sigma(B)$  in  $E$  eine *richtungsvollständige, stetige Geradenschar im  $R^3$* . Über solche Scharen hat H. HADWIGER in [1] und [2] die folgende Vermutung ausgesprochen:

**Satz 1.** *In jeder richtungsvollständigen, stetigen Geradenschar im  $R^3$  lassen sich drei paarweise orthogonalstehende Geraden finden, die sich in einem Punkt schneiden.*

Als Beispiel mag das erwähnte Büschel  $B$  dienen;  $B$  bildet eine richtungsvollständige, stetige Geradenschar, bei der sich sogar jedes Tripel von paarweise orthogonalstehenden Geraden in einem Punkt, nämlich in  $0$ , schneidet. Ein weniger triviales Beispiel, bei dem noch eine eindimensionale Schar von Tripeln mit den verlangten Eigenschaften existiert, findet sich in [1] angegeben. Daß auch im Hinblick auf Satz 1 bestmögliche Beispiele existieren, zeigt

**Satz 2.** *Es gibt im  $R^3$  richtungsvollständige, stetige Geradenscharen, welche ein einziges Tripel von Geraden, die sich in einem Punkt paarweise orthogonal schneiden, enthalten.*

Die vorliegende Note erbringt einen Beweis von Satz 1, und zwar wesentlich gestützt auf den Nachweis von Satz 2. Es scheint mir, daß das Analogon von Satz 2 für richtungsvollständige, stetige Geradenscharen im  $R^n$  ( $n > 3$ ) nicht gilt.

Die Geradenmenge  $E$  mit der angegebenen Topologie und mit der erwähnten Abbildung  $\pi$  (durch Parallelverschiebung) auf die Richtungsmenge  $B$  kann auch als Faserbündel über  $B$ , mit  $R^2$  als Faser, aufgefaßt werden; als Faser-

bündel ist sie zum Tangentialbündel der projektiven Ebene äquivalent. Auf diese Weise kann eine richtungsvollständige, stetige Geradenschar  $\Sigma$  als Schnitt über dem Basisraum  $B$  definiert werden. Dieser Auffassung als Faserbündel liegt allerdings die Struktur des Sichschneidens von Geraden im  $R^3$  ferner, so daß wir sie nicht weiter ausnützen können. Dagegen wird im Beweis von Satz 1 wesentlich benutzt, daß  $E$  eine vierdimensionale topologische Mannigfaltigkeit ist, in der jede richtungsvollständige, stetige Geradenschar  $\Sigma$  eine zweidimensionale Teilmannigfaltigkeit bildet.

**2. Beweis von Satz 2.** a) Wir geben eine richtungsvollständige, stetige Geradenschar  $\Sigma_0$  im  $R^3$  an, die genau ein Orthogonaldreibein enthält; dabei soll fortan mit *Orthogonaldreibein* die Konfiguration von drei sich in einem Punkt schneidenden, paarweise orthogonalen Geraden gemeint sein. Wir verwenden rechtwinklige, kartesische Koordinaten  $(x, y, z)$  für Punkte und für Vektoren im  $R^3$ . Für Punkte auf der Einheitssphäre  $S^2 \subset R^3$  benutzen wir außerdem die geographische Länge  $\varphi$  (mit  $-\infty < \varphi < \infty$ ) und die geographische Breite  $\theta$  (mit  $-\frac{1}{2}\pi \leq \theta \leq \frac{1}{2}\pi$ ). Jede Gerade  $g$  des  $R^3$  soll durch die vektorielle Parameterdarstellung

$$g: \mathbf{x} = \mathbf{p} + t \cdot \mathbf{r} \quad (-\infty < t < \infty) \quad (1)$$

charakterisiert werden, wobei  $\mathbf{p}$  den Ortsvektor eines Aufpunktes und  $\mathbf{r}$  einen Richtungsvektor bezeichnet. Ist dabei

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\varphi, \theta) = (\cos \varphi \cos \theta, \sin \varphi \cos \theta, \sin \theta), \quad (2)$$

so durchstößt die zu  $g$  parallele Gerade  $\pi(g)$  durch 0 die  $S^2$  in den Punkten  $(\varphi, \theta)$  und  $(\varphi + \pi, -\theta)$ . Die in Aussicht gestellte Schar  $\Sigma_0$  charakterisieren wir formelmäßig, indem wir  $\mathbf{p}$  in Abhängigkeit von  $\varphi$  und  $\theta$  angeben.

Wir wählen eine genügend große reelle Zahl  $N$  (es genügt  $N > \sqrt{2}$ ) und eine stetige Funktion einer reellen Veränderlichen mit reellen Werten  $c(\theta)$  derart, daß gilt:

$$\begin{aligned} c(|\theta|) = -c(-|\theta|) > 0 \quad \text{für } \operatorname{arctg} N^{-1} < |\theta| < \operatorname{arctg} 2N \\ c(\theta) = 0 \quad \text{sonst.} \end{aligned} \quad (3)$$

Dem Richtungsvektor (2) ordnen wir den folgenden Aufpunkt

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_0(\varphi, \theta) \text{ zu:}$$

$$\mathbf{p}_0(\varphi, \theta) = (0, 0, 2N^2 \operatorname{tg}^2 \theta + [1 - N^2 \operatorname{tg}^2 \theta] \sin 2\varphi) \quad (4_f)$$

falls  $0 \leq |\theta| \leq \operatorname{arctg} N^{-1}$

$$\mathbf{p}_0(\varphi, \theta) = (c(\theta) \sin \varphi, -c(\theta) \cos \varphi, 2) \quad (4_m)$$

falls  $\operatorname{arctg} N^{-1} \leq |\theta| \leq \operatorname{arctg} 2N$

$$p_0(\varphi, \theta) = (0, 0, 2) \quad \text{falls } \operatorname{arctg} 2N \leq |\theta| \leq \frac{1}{2}\pi. \quad (4_s)$$

Nach den Voraussetzungen über  $c(\theta)$  ist  $p_0(\varphi, \theta) = p_0(\varphi + \pi, -\theta)$ , und für  $|\theta| = \operatorname{arctg} N^{-1}$  bzw.  $\operatorname{arctg} 2N$  ergeben die beiden Berechnungsmöglichkeiten in (4) dieselben Werte. Deshalb bilden die Geraden  $g: x = p_0(\varphi, \theta) + tx(\varphi, \theta)$  eine richtungsvollständige, stetige Geradenschar  $\Sigma_0$  (für  $|\theta| = \frac{1}{2}\pi$  ist die Schar regulär!).  $\Sigma_0$  ist, entsprechend den drei Varianten in (4), die Vereinigung von drei Teilscharen  $\Sigma_f$  (flach liegende Geraden),  $\Sigma_m$  (mäßig steile Geraden) und  $\Sigma_s$  (steile Geraden). Die einem festen Wert von  $\theta$  entsprechenden Geraden bilden den Mantel eines Rotationsdoppelkegels mit Spitze  $(0, 0, 2)$ , sofern sie zu  $\Sigma_s$  gehören, und sie bilden eine der Geradenscharen auf einem Rotationshyperboloid mit Striktionskreisradius  $|c(\theta)|$  und Striktionskreiszentrum  $(0, 0, 2)$ , sofern sie zu  $\Sigma_m$  gehören. Gleich wie für  $|\theta| = \operatorname{arctg} 2N$  entartet für  $|\theta| = \operatorname{arctg} N^{-1}$  dieses Hyperboloid zu einem Doppelkegelmantel. Die für  $\theta = 0$  entstehenden horizontalen Geraden treffen die  $z$ -Achse in je nach dem Wert von  $\varphi$  variierenden Punkten. Zwischen diesen beiden letztgenannten eindimensionalen Scharen bildet  $\Sigma_f$  eine stetige Verbindung, wobei jede Gerade die  $z$ -Achse schneidet, und zwar für  $|\theta| \neq \operatorname{arctg} N^{-1}$  nicht im Punkt  $(0, 0, 2)$ .

Die drei Koordinatenachsen  $a_x, a_y, a_z$  gehören zur Schar  $\Sigma_0$ ; wir wollen nun zeigen, daß sie das einzige Orthogonaldreibein von  $\Sigma_0$  bilden.

b) Wir behaupten, daß sich keine zwei Geraden der Teilschar

$$\Sigma_0 - \Sigma_f - \Sigma_s$$

unter rechtem Winkel schneiden. Diese Teilschar ist Untermenge von  $\Sigma_m$ , und wir können der Bestimmtheit halber und ohne Einschränkung der Allgemeinheit annehmen, es sei  $0 < \theta < \frac{1}{2}\pi$  und  $c(\theta) > 0$ . Wir betrachten die zwei den Parameterwerten  $(\varphi_i, \theta_i)$   $i = 1, 2$  entsprechenden Geraden. Schneiden sie sich in einem Punkt  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , so gilt wegen (1) für  $i = 1, 2$

$$\begin{aligned} c(\theta_i) \sin \varphi_i + t_i \cos \theta_i \cos \varphi_i &= \bar{x} \\ t_i \cos \theta_i \sin \varphi_i - c(\theta_i) \cos \varphi_i &= \bar{y} \\ 2 + t_i \sin \theta_i &= \bar{z}. \end{aligned}$$

Löst man diese Gleichungen nach  $t_i, \sin \varphi_i, \cos \varphi_i$  auf und substituiert die Lösungswerte in

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2, \quad (5)$$

so ergibt sich

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{(\bar{x}^2 + \bar{y}^2) c(\theta_1) c(\theta_2) + (\bar{z} - 2)^2 \operatorname{ctg} \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_2}{[c(\theta_1)^2 + t_1^2 \cos^2 \theta_1] [c(\theta_2)^2 + t_2^2 \cos^2 \theta_2]} > 0. \quad (6)$$

Sind andererseits die Richtungsvektoren  $r(\varphi_i, \theta_i)$  der betrachteten Geraden zueinander orthogonal, so ergibt das Nullsetzen des Skalarprodukts

$$\cos \varphi_i \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \operatorname{tg} \theta_1 \operatorname{tg} \theta_2 = 0,$$

also

$$\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = -\operatorname{tg} \theta_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2 < 0. \quad (7)$$

Der Vergleich von (6) und (7) erhärtet die Behauptung.

c) Wir behaupten weiter, daß es in der Teilschar  $\Sigma_f$  kein Orthogonaldreibein, in der Schar  $\Sigma_s$  nicht einmal ein Orthogonalzweibein gibt. In der Tat: In den für  $\theta = 0$  bzw.  $|\theta| = \frac{1}{2}\pi$  entstehenden Teilscharen gibt es offensichtlich keine Orthogonaldreibeine bzw. Orthogonalzweibeine; und wählt man  $N$  genügend groß, läßt also nur «sehr» flach liegende bzw. «sehr» steile Geraden zu  $\Sigma_f$  bzw.  $\Sigma_s$  zu, so bleibt die behauptete Eigenschaft aus Stetigkeitsgründen erhalten. Eine genauere Rechnung zeigt, daß für die Gültigkeit der Behauptung  $N > \sqrt{2}$  hinreicht, doch wird der Wert dieser Schranke nicht weiter benötigt.

d) Es sei  $\{g_1, g_2, g_3\}$  ein Orthogonaldreibein in  $\Sigma_0$  und  $P$  der gemeinsame Schnittpunkt von  $g_1, g_2, g_3$ . Wegen b) gehören mindestens zwei dieser Geraden zu  $\Sigma_f \cup \Sigma_s$ , etwa  $g_2$  und  $g_3$ . Wir können sogar annehmen, daß die  $z$ -Achse  $a_z$  nicht parallel zu der von  $g_2$  und  $g_3$  aufgespannten Ebene  $\Gamma_1$  ist. Ist sie es nämlich doch, so steht  $g_1$  orthogonal zu  $a_z$  und somit gilt auch  $g_1 \in \Sigma_f \cup \Sigma_s$ , und nach einer passenden Indexpermutation trifft dann die Annahme doch zu. Die  $z$ -Achse durchstößt also  $\Gamma_1$  in einem eindeutig festgelegten Punkt  $P_1$ ; da aber nach  $(4_{f,s})$  die  $z$ -Achse eine jede Gerade von  $\Sigma_f \cup \Sigma_s$  trifft, insbesondere auch  $g_2$  und  $g_3$ , muß  $P_1 = P$  sein. Dann trifft  $a_z$  aber auch  $g_1$  in  $P$ , und daraus folgt wegen  $(4_m)$ , daß  $g_1 \in \Sigma_f \cup \Sigma_s$  sein muß. Bis auf eine Permutation der Indizes ist dann wegen c) nur der Fall möglich, daß  $g_1 \in \Sigma_s$  und  $g_2, g_3 \in \Sigma_f$  gilt. Ist  $|\theta_1| = \frac{1}{2}\pi$ , so ist  $\theta_2 = \theta_3 = 0$ , also nach  $(4_f)$   $\sin 2\varphi_2 = z_2 = z_3 = \sin 2\varphi_3$ ; da zugleich  $\varphi_2 - \varphi_3 \equiv \frac{1}{2}\pi \pmod{\pi}$  gelten muß, folgt  $\varphi_2 \equiv 0 \pmod{\frac{1}{2}\pi}$ , so daß es sich um das Tripel  $\{a_x, a_y, a_z\}$  handelt. Ist aber  $|\theta_1| \neq \frac{1}{2}\pi$ , so kann der auf der  $z$ -Achse liegende Punkt  $P$  der Geraden  $g_1$  nach  $(4_s)$  nur der Punkt  $(0, 0, 2)$  sein. Aus  $g_2, g_3 \in \Sigma_f$  folgt dann wegen  $(4_f)$   $\theta_2 = \theta_3 = \operatorname{arctg} N^{-1}$ . Die Richtungsvektoren der drei Geraden sind dann gleichgerichtet mit den Vektoren  $(\cos \varphi_1, \sin \varphi_1, \operatorname{tg} \theta_1)$ ,  $(\cos \varphi_2, \sin \varphi_2, N^{-1})$  und  $(\cos \varphi_3, \sin \varphi_3, N^{-1})$ , und der rechte Winkel zwischen  $g_1$  und  $g_2$  drückt sich aus durch  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = -N^{-1} \operatorname{tg} \theta_1$ . Wegen  $|\operatorname{tg} \theta_1| \geq 2N$  gemäß  $(4_s)$  und wegen  $|\cos(\varphi_1 - \varphi_2)| \leq 1$  sieht man ein, daß der eben erwogene Fall nicht auftreten kann. Damit ist Satz 2 bestätigt.

**3. Beweis von Satz 1.** a) Im  $R^3$  sei  $g_0$  eine Gerade; es lassen sich Ebenen  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$  wählen, die zueinander parallel liegen und verschieden sind, und die von  $g_0$  und von jeder Koordinatenachse des festgewählten  $(x, y, z)$ -

Systems in genau einem Punkt durchstoßen werden. Jeder Geraden  $g$ , die  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$  in je einem Punkt  $P' = (x', y', z')$  bzw.  $P'' = (x'', y'', z'')$  durchstößt, ordnen wir das Quadrupel

$$X_{\Gamma', \Gamma''}(g) = (x', y', x'', y'')$$

zu. Unter den gemachten Voraussetzungen bestimmen sich  $g$  und  $X_{\Gamma', \Gamma''}(g)$  gegenseitig eindeutig und stetig, so daß  $X_{\Gamma', \Gamma''}$  in der Mannigfaltigkeit  $E$  der Geraden des  $R^3$  ein lokales Koordinatensystem in der Umgebung von  $g_0$  bildet. Durch kartesische Produktbildung erhalten wir die Mannigfaltigkeit  $E \times E \times E$  der geordneten Geradentripel  $(g_1, g_2, g_3)$ . Zu jedem Geradentripel können wir Ebenen  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$  finden, die die genannten Voraussetzungen in bezug auf jede Gerade des Tripels (anstelle von  $g_0$ ) erfüllen; die zwölf reellen Zahlen von  $X_{\Gamma', \Gamma''}(g_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , können dann in der Umgebung des Tripels als lokale Koordinaten in  $E \times E \times E$  dienen.

Für den Übergang zu ungeordneten Tripeln ist es angezeigt, alle Tripel  $(g_1, g_2, g_3)$ , für die mindestens eine der Gleichungen  $g_1 = g_2$ ,  $g_1 = g_3$ ,  $g_2 = g_3$  gilt, wegzulassen; mit Hinsicht auf einen zu verwendenden Hilfssatz reduzieren wir  $E \times E \times E$  noch stärker. Dazu bezeichnen wir mit  $D(g)$  den euklidischen Abstand der Geraden  $g$  vom Ursprung  $0 \in R^3$  und mit  $V(g_1, g_2, g_3)$  das Volumen eines Parallelepipeds, dessen von einer Ecke auslaufenden Kanten parallel zu  $g_1, g_2$  und  $g_3$ , bezüglich, sind und je die Länge 1 haben. Jedem Tripel  $\tau = (g_1, g_2, g_3)$  ordnen wir die Zahlen

$$\delta(\tau) = D(g_1) + D(g_2) + D(g_3) \quad (8)$$

und

$$\omega(\tau) = V(g_1, g_2, g_3) \quad (9)$$

zu. Nun sondern wir die Teilmenge

$$F = \{\tau \in E \times E \times E \mid \delta(\tau) \leq M \text{ und } \omega(\tau) \geq M^{-1}\} \quad (10)$$

aus, wo  $M$  eine später noch festzulegende Zahl  $> 1$  ist.  $F$  ist eine berandete Mannigfaltigkeit; diese enthält mit jedem Tripel  $\tau = (g_1, g_2, g_3)$  auch alle daraus durch Permutationen entstehenden Tripel; dasselbe gilt vom Rand von  $F$ . In  $F$  stiftet die Aequivalenz eines Tripels mit allen aus ihm durch Permutation entstehenden Tripeln eine Aequivalenzrelation, bei der der Übergang zu den Klassen  $\bar{\tau}$  den Übergang von geordneten Tripeln  $(g_1, g_2, g_3)$  zu ungeordneten Tripeln  $\{g_1, g_2, g_3\}$  bedeutet.  $G$  sei die Menge dieser Aequivalenzklassen in  $F$ , versehen mit der Identifikationstopologie. Offenbar ist  $G$  eine berandete, zwölfdimensionale, kompakte Mannigfaltigkeit. Die Funktionen  $\delta$  und  $\omega$  sind wie oben auch für ungeordnete Tripel  $\bar{\tau}$  definiert. Setzt man  $\Delta = \{\bar{\tau} \in G \mid \delta(\bar{\tau}) = M\}$  und  $\Omega = \{\bar{\tau} \in G \mid \omega(\bar{\tau}) = M^{-1}\}$ , so gilt für

den Rand  $\partial G$  von  $G$  die Beziehung  $\partial G = \Delta \cup \Omega$ . Da  $F$  eine (sechsblättrige) unverzweigte Überlagerung von  $G$  ist, können die Zahlen

$$X_{\Gamma', \Gamma''}(g_i), \quad i = 1, 2, 3,$$

genauer: die geordneten Zwölftupel

$$(x'_1, y'_1, x''_1, y''_1; x'_2, y'_2, x''_2, y''_2; x'_3, y'_3, x''_3, y''_3) \quad (11)$$

als lokale Koordinaten des Tripels  $\{g_1, g_2, g_3\}$  benutzt werden.

Es sei  $H$  die Teilmenge aller Orthogonaldreibeine in  $G$ . Daß die Geraden  $g_k, g_l$  orthogonale Richtung haben, wird durch das Verschwinden des Skalarprodukts der Vektoren  $P'_k P''_k$  und  $P'_l P''_l$  ausgedrückt, in den lokalen Koordinaten (11) also durch die Gleichung

$$H_i \equiv (x'_k - x''_k)(x'_l - x''_l) + (y'_k - y''_k)(y'_l - y''_l) + (z'_k - z''_k)(z'_l - z''_l) = 0, \quad (12)$$

wobei  $z'$  und  $z''$  mittels der Ebenengleichungen von  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$  durch  $x', y', x'', y''$  auszudrücken sind. Daß sich  $g_k$  und  $g_l$  schneiden oder wenigstens koplanar sind, wird durch das Verschwinden der Volumendeterminante der Punkte  $P'_k, P''_k, P'_l, P''_l$  ausgedrückt; in lokalen Koordinaten ergibt dies die Gleichung

$$H_{i+3} \equiv (x'_k - x'_l)(y''_k - y''_l) - (y'_k - y'_l)(x''_k - x''_l) = 0. \quad (13)$$

Die sechs Gleichungen, die aus (12) und (13) entstehen, wenn  $(i, k, l)$  durch zyklische Vertauschungen aus  $(1, 2, 3)$  entsteht, bilden die lokalen Bedingungen dafür, daß  $\{g_1, g_2, g_3\} \in H$  gilt. Die Menge  $H$  der Orthogonaldreibeine in  $G$  bildet daher eine sechsdimensionale Teilmannigfaltigkeit von  $G$ , und ihr Rand  $\partial H$  liegt ganz auf  $\partial G - \Omega$ , da ja für  $\bar{\tau} \in H$   $\omega(\bar{\tau}) = 1$  gilt. Es sei  $\Sigma_1$  irgend eine richtungsvollständige, stetige Geradenschar in  $\mathbb{R}^3$ . Wählt man die Konstante  $M$  in (10) so, daß  $M > 3 \max D(g)$ , das Maximum erstreckt über  $g \in \Sigma_0 \cup \Sigma_1$ , gilt (wo  $\Sigma_0$  die in 2 konstruierte Schar ist), so bildet die Menge  $J(\Sigma_1)$  derjenigen Tripel  $\{g_1, g_2, g_3\} \in G$ , für welche  $g_i \in \Sigma_1$  ( $i = 1, 2, 3$ ) gilt, eine sechsdimensionale Teilmannigfaltigkeit von  $G$ , deren Rand  $\partial J(\Sigma_1)$  ganz auf  $\partial G - \Delta$  liegt, und dasselbe gilt für  $\Sigma_0$  und für alle Scharen

$$\Sigma_\lambda \quad (0 \leq \lambda \leq 1),$$

die wie folgt aus  $\Sigma_0$  und  $\Sigma_1$  entstehen: man lasse jede Gerade von  $\Sigma_0$  in der Zeiteinheit durch gleichförmige Parallelverschiebung in einer Ebene in die zu ihr parallele Gerade von  $\Sigma_1$  laufen;  $\Sigma_\lambda$  ist dann die zur Zeit  $\lambda$  gebildete richtungsvollständige, stetige Geradenschar. Um Satz 1 zu beweisen, muß gezeigt werden, daß  $G \cap J(\Sigma_1)$  nicht leer ist. Wir zeigen mehr, nämlich daß bei Homologie mit der zyklischen Gruppe der Ordnung 2 als Koeffizienten-

bereich die Teilmannigfaltigkeiten  $H$  und  $J(\Sigma_1)$  in  $G$  die Schnittzahl 1 haben. Wir werden unter b) zeigen, daß diese Behauptung jedenfalls für  $\Sigma_0$  (anstelle von  $\Sigma_1$ ) zutrifft. Dann gilt sie aber auch für  $\Sigma_1$  nach dem folgenden

**Hilfssatz:**  $L^{k+1}$  bzw.  $L^{n-k}$  seien zwei singuläre  $k+1$ - bzw.  $n-k$ -Ketten in der triangulierbaren, berandeten, kompakten,  $n$ -dimensionalen Mannigfaltigkeit  $G$ . Besteht der Rand (mod 2)  $\partial L^{k+1}$  von  $L^{k+1}$  aus den Ketten  $J_0$  und  $J_1$  und aus weiteren  $k$ -dimensionalen Ketten, die zu  $L^{n-k}$  punktfremd sind, und sind die Bedingungen  $(\partial J_0 \cup \partial J_1) \cap L^{n-k} = L^{k+1} \cap \partial L^{n-k} = L^{k+1} \cap L^{n-k} \cap \partial G = \emptyset$  erfüllt, so haben  $J_0$  und  $J_1$  mit  $L^{n-k}$  dieselben Schnittzahlen mod. 2.

Dies ergibt sich aus dem Satz auf S. 248 des Lehrbuchs von H. SEIFERT und W. THRELFALL durch die in Anmerkung 41, S. 324 daselbst, erwähnte Modifikation; die vorliegende Sachlage ist bewiesen in [3], S. 46–52. In unserm Fall ist  $J_0 = J(\Sigma_0)$ ,  $J_1 = J(\Sigma_1)$ ,  $L^{n-k} = H$  zu setzen; die singuläre Mannigfaltigkeit  $L^{k+1}$  ergibt sich durch die Homotopie, die zwischen  $J(\Sigma_0)$  und  $J(\Sigma_1)$  durch die Scharen  $J(\Sigma_\lambda)$  ( $0 \leq \lambda \leq 1$ ) vermittelt wird; bei dieser Homotopie wird  $\partial J(\Sigma_0)$  auf  $\Omega$ , noch genauer: auf  $\partial G - \Delta$  in  $\partial J(\Sigma_1)$  übergeführt; ferner liegt  $\partial H$  auf  $\Delta$ , genauer: auf  $\partial G - \Omega$ . Ob die durch (10) und die weitere Konstruktion definierte Mannigfaltigkeit  $G$  triangulierbar ist, sieht man nicht unmittelbar ein. Aber durch eine geringe Modifikation in einer beliebig kleinen Umgebung der «Kantenpunktmenge»  $\Delta \cap \Omega$  wird aus  $G$  eine differenzierbare und damit triangulierbare Mannigfaltigkeit. Man hat dazu bloß die zwei Bedingungen in (10) durch die eine Bedingung

$$f(\delta(\tau)) \cdot \omega(\tau)^{-1} + f(\omega(\tau)^{-1}) \cdot \delta(\tau) \leq M$$

zu ersetzen; dabei ist  $f$  eine differenzierbare reelle Funktion einer reellen Variablen, mit Werten zwischen 0 und 1, mit  $f(x) = 0$  für  $x \leq M - \varepsilon$  und  $f(x) = 1$  für  $x \geq M$ , und bei genügend kleinem positiven  $\varepsilon$  fallen dabei keine Punkte  $\bar{\tau}$  von  $G$  weg, die zu  $H$  oder zu einer der Scharen  $J(\Sigma_\lambda)$  gehören.

b) Es bleibt zu zeigen, daß die Schnittzahl mod 2 von  $H$  und  $J(\Sigma_0)$  den Wert 1 hat. Aus 2d) entnimmt man, daß  $J(\Sigma_0)$  und  $H$  einen einzigen Punkt gemeinsam haben, nämlich das Tripel  $\alpha = \{a_x, a_y, a_z\}$  der Koordinatenachsen. Ergänzend haben wir nachzuweisen, daß sich  $J(\Sigma_0)$  und  $H$  in  $\alpha$  durchsetzen. Da diese beiden Teilmannigfaltigkeiten in einer Umgebung von  $\alpha$  differenzierbar sind, hat man rechnerisch zu zeigen, daß die Tangentialräume von  $J(\Sigma_0)$  und  $H$  in  $\alpha$  einzig den Nullvektor gemeinsam haben. Wir können in einer Umgebung von  $\alpha$  die lokalen Koordinaten (11) mit Hilfe der Ebenengleichungen  $\Gamma': x' + y' + z' = 0$ ,  $\Gamma'': x'' + y'' + z'' = 1$  bestimmen. Nach einer Umbenennung der Koordinaten  $x'_1, \dots, y''_3$  in  $u_1, \dots, u_{12}$  (in dieser



Reihenfolge) ergibt sich aus den Schnittpunkten der Koordinatenachsen mit  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$ , daß  $\alpha = (0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1; 0, 0, 0, 0)$  gilt und daß an dieser Stelle die Funktionalmatrix  $\|\partial H_i/\partial u_k\|$  (vgl. (12) und (13)) durch die Matrix

$$\left\| \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| \quad (14)$$

vom Rang 6 gegeben ist. Aus den Gleichungen  $(4_{\gamma, s})$  lassen sich ebenfalls die Durchstoßpunkte mit  $\Gamma'$  und  $\Gamma''$  und damit die lokalen Koordinaten

$$u_i(\varphi_1, \theta_1, \varphi_2, \theta_2, \varphi_3, \theta_3), \quad i = 1, \dots, 12,$$

eines Tripels  $\{g_1(\varphi_1, \theta_1), g_2(\varphi_2, \theta_2), g_3(\varphi_3, \theta_3)\}$  in der Umgebung von  $\alpha$  explizit berechnen und damit sechs linear unabhängige Tangentialvektoren an  $J(\Sigma_0)$  in  $\alpha$  bestimmen, nämlich

$$\begin{aligned} v_1 &= (\partial u_i/\partial \varphi_1) |_{\alpha} &&= (-2, 0, -3, 1; 0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0) \\ v_2 &= (\partial u_i/\partial \theta_1) |_{\alpha} &&= (0, 0, 0, -1; 0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0) \\ v_3 &= (\partial u_i/\partial \varphi_2) |_{\alpha} &&= (0, 0, 0, 0; 0, 2, -1, 3; 0, 0, 0, 0) \\ v_4 &= (\partial u_i/\partial \theta_2) |_{\alpha} &&= (0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, -1; 0, 0, 0, 0) \\ v_5 &= (\partial u_i/\partial \theta_3)_{\varphi_3=0} |_{\alpha} &&= (0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0; 2, 0, 1, 0) \\ v_6 &= (\partial u_i/\partial \theta_3)_{\varphi_3=\pi/2} |_{\alpha} &&= (0, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 0; 0, 2, 0, 1). \end{aligned} \quad (15)$$

Ist irgend eine Linearkombination

$$\sum_1^6 \gamma_i v_i = (-2\gamma_1, 0, -3\gamma_1, \gamma_1 - \gamma_2; 0, 2\gamma_3, -\gamma_3, 3\gamma_3 - \gamma_4; 2\gamma_5, 2\gamma_6, \gamma_5, \gamma_6)$$

zugleich Tangentialvektor  $(\dot{u}_1, \dots, \dot{u}_{12})$  von  $H$  in  $\alpha$ , so gilt

$$\sum_1^{12} (\partial H_i/\partial u_k) \cdot \dot{u}_k = 0 \quad (i = 1, \dots, 6). \quad (16)$$

Daraus ergibt sich leicht mit (14) und (15), daß  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_6 = 0$  ist. Damit ist gezeigt, daß sich  $H$  und  $J(\Sigma_0)$  durchsetzen.

#### LITERATUR

[1] H. HADWIGER, *Ungelöste Probleme*, Nr. 39. *Elemente der Math.* 16, 30–31 (1961).  
 [2] H. HADWIGER, *Kleine Studie zur elementaren Stetigkeitsgeometrie*. Jahresber. Deutsche Math, Ver. 64, 78–81 (1961).  
 [3] E. R. VAN KAMPEN, *Die kombinatorische Topologie und die Dualitätssätze*. Den Haag 1929,

(Eingegangen den 15. Dezember 1961)