

# Klassische Beleuchtungsgeometrie im [Formel]. I, Bekannte Kurvenklassen in der Beleuchtungsgeometrie des [Formel]

Autor(en): [s.n.]

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Elemente der Mathematik**

Band (Jahr): **46 (1991)**

Heft 3

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-43271>

## **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.

- 5 deValcourt B. A.: Axially symmetric polygons inscribed in and circumscribed about convex sets. Elem. Math. 22, 121–133 (1967).
- 6 Giering O.: Ein mechanisches Modell zur Lösung gewisser Extremalaufgaben. Elem. Math. 22, 5–11 (1967).
- 7 Grünbaum B.: Measures of symmetry for convex sets. Proc. Symp. Pure Math., Amer. Math. Soc. 7, 233–270 (1963).
- 8 Krakowski F.: Bemerkung zu einer Arbeit von W. Nohl. Elem. Math. 18, 60–61 (1963).
- 9 Nohl W.: Die innere axiale Symmetrie zentrischer Eibereiche der euklidischen Ebene. Elem. Math. 17, 59–63 (1962).

© 1991 Birkhäuser Verlag, Basel

0013-6018/91/030065-09\$1.50 + 0.20/0

## Klassische Beleuchtungsgeometrie im $E^d$ ( $d \geq 2$ )

### I. Bekannte Kurvenklassen in der Beleuchtungsgeometrie des $E^d$ ( $d \geq 2$ )

Untersuchungen zur Beleuchtung von Flächen sind naturgemäss mit der Physik und Geometrie des dreidimensionalen euklidischen Raumes  $E^3$  verknüpft. Gerade in jüngster Zeit hat die *Beleuchtungsgeometrie* eine merkliche Wiederbelebung erfahren, so dass auch Betrachtungen, die über eigentliche Anregungen hinausgehen, nahegelegt werden. Dazu gehört eine Übertragung klassischer Ergebnisse auf den beliebigdimensionalen Raum  $E^d$  ( $d \geq 2$ ).

#### 1. Begriffswelt mit $d$ -dimensionalem Abstandsgesetz

Grundbegriffe der auf den  $E^3$  bezogenen Beleuchtungstechnik und -geometrie werden sinngemäss aus [8] bzw. [3] übernommen. Der geometrische Raum  $E^d$  ( $d \geq 2$ ) sei bezüglich eines kartesischen Normalkoordinatensystems durch den Raum der Koordinatenvektoren  $\mathbf{R}^d$  beschrieben, wobei Punkte durch ihre Koordinatenvektoren bezeichnet sind (z. B.  $\mathbf{x}$ ). Weiterhin steht  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  für das *innere Produkt*,  $\| \cdot \|$  für die *euklidische Norm*,  $S^{d-1} := \{ \mathbf{u} \in \mathbf{R}^d \mid \langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle = 1 \}$  für die *Einheitssphäre* und  $\mathbf{o}$  für den *Koordinatennullpunkt* des  $E^d$ .

Ein *orientiertes Flächenelement* sei mit  $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  bezeichnet, wobei  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^d$  den Träger und  $\mathbf{u} \in S^{d-1}$  den Stellung und Orientierung des Elements angegebenden Normaleneinheitsvektor bedeuten. Ist  $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  von  $t$  Parametern  $v_1, \dots, v_t$  abhängig, dann liegt (im Anschluss an [6], S. 528 ff. und S. 33 ff., sowie [4], S. 102 ff.) eine *Element- $t$ -Schar* vor.

Für  $\{ \mathbf{x}(v_1, \dots, v_t), \mathbf{u}(v_1, \dots, v_t) \}$  seien alle wünschenswerten analytischen Eigenschaften vorausgesetzt und uninteressante Ausartungen ausgeschlossen. Eine Elementenschar ist ein *Element- $t$ -Verein*, wenn in jedem Punkt der Trägermannigfaltigkeit  $\{ \mathbf{x}(v_1, \dots, v_t) \}$  die durch  $\mathbf{u}$  beschriebenen  $(d-1)$ -Ebenen den Tangentialraum enthalten. Insbesondere sind hier jene Elementvereine  $\{ \mathbf{x}(v_1), \mathbf{u}(v_1) \}$  interessant, die im differentialgeometrischen Sinne *Streifen* bilden (Streifenbedingung:  $\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u} \rangle = 0$ ). Eine *geometrische Zentralbeleuchtung* des  $E^d$  wird durch das Paar  $(\mathbf{q}, I(\mathbf{n}))$  beschrieben, wobei  $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^d$  die punktförmige Lichtquelle

repräsentiert und  $I(\mathbf{n})$  die den orientierten Abstrahlrichtungen  $\mathbf{n} \in S^{d-1}$  je zugeordnete Lichtstärke von  $\mathbf{q}$  wiedergibt.

Ist  $I(\mathbf{n}) > 0$  konstant über  $S^{d-1}$ , so erhält man die hier ausschliesslich betrachtete, bezüglich der Dimension verallgemeinerte *klassische Zentralbeleuchtung*.

Die *Beleuchtungsstärke* des Elements  $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  mit  $\mathbf{x} \neq \mathbf{q}$  ist durch

$$E(\mathbf{x}, \mathbf{u}) := I(\mathbf{n}) \cdot r^{1-d} \cdot \frac{1}{2}(\cos \varphi + |\cos \varphi|) \quad (1)$$

mit den Vereinbarungen  $\varphi := \angle(\mathbf{q} - \mathbf{x}, \mathbf{u})$ ,  $r := \|\mathbf{q} - \mathbf{x}\|$  und  $\mathbf{n} := \frac{\mathbf{x} - \mathbf{q}}{\|\mathbf{x} - \mathbf{q}\|}$  gegeben. Diese

Beziehung (1) stellt eine Verallgemeinerung des klassischen *photometrischen Abstands-gesetzes*

$$E(\mathbf{x}, \mathbf{u}) := \begin{cases} I(\mathbf{n}) \cdot r^{-2} \cdot \cos \varphi & \text{für } 0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{für } \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \end{cases} \quad (1^*)$$

im  $E^3$  dar. Mit der Vereinfachung  $\mathbf{u} = -\mathbf{n}$  wird (1\*) bekanntlich aus dem sogenannten *Lichtstrom-Flächen-Gesetz*

$$E(\mathbf{x}, -\mathbf{n}) = \frac{\Omega}{4\pi r^2} \quad (2^*)$$

hergeleitet (vgl. [8], §I), in dem  $\Omega := \int_{S^2} I(\mathbf{n}) d\mathbf{n} = 4\pi \cdot I(\mathbf{n})$  den Gesamtlichtstrom der Quelle  $\mathbf{q}$  mit über  $S^2$  konstant gedachter Lichtstärke  $I(\mathbf{n}) > 0$  darstellt. Durch Modifikation der dimensionsabhängigen Grössen in (2\*) erhält man für den  $R^d$

$$E(\mathbf{x}, -\mathbf{n}) := \frac{\Omega \cdot r^{1-d}}{d\omega_d}, \quad \text{wo } \omega_d := \frac{\pi^{\frac{d}{2}}}{\Gamma\left(1 + \frac{d}{2}\right)}, \quad (2)$$

was durch Vereinfachung und unter Berücksichtigung des dimensionsunabhängigen Faktors

$$\frac{1}{2}(\cos \varphi + |\cos \varphi|) = \frac{1}{2}(\langle -\mathbf{n}, \mathbf{u} \rangle + |\langle -\mathbf{n}, \mathbf{u} \rangle|)$$

bei durch beliebiges  $\mathbf{n}$  beschriebenem Lichteinfall im Element  $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  unmittelbar auf (1) führt.

Orientierte Flächenelemente, die bei einer geometrischen Zentralbeleuchtung gleiche (positive) Beleuchtungsstärke haben, heissen *isophotisch*; Mengen aus isophotischen Flächenelementen werden *isophotische Elementmengen*, speziell also isophotische Scharen, Streifen, Flächen etc., genannt.

## 2. Isophotische Elementscharen fester Stellung

Für eine klassische geometrische Zentralbeleuchtung  $(q, I(\mathbf{n})) = (\mathbf{o}, 1)$  sollen hier aus allen Elementen  $(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  mit fixiertem  $\mathbf{u} = -\mathbf{e}_1 := (-1, 0, \dots, 0)$  und  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d \setminus \{\mathbf{o}\}$  jene gleicher Beleuchtungsstärke  $E > 0$  ausgewählt werden. Die Frage nach entsprechenden Elementscharen im  $E^3$  wurde von Bohne [1] angeregt. Aus (1) (o.B.d.A. mit  $I(\mathbf{n}) = 1$ ) wird deutlich, dass die gesuchte Elementchar die Gerade durch  $q = \mathbf{o}$  mit  $-\mathbf{e}_1$  als Richtungsvektor zur Symmetrale hat. Mit  $r = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_d^2}$  und  $\cos \varphi = \frac{x_1}{r}$  hat diese isophotische Elementmenge folglich die Darstellung

$$\{(\mathbf{x}, -\mathbf{e}_1) | \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d \text{ mit } 2E(x_1^2 + \dots + x_d^2)^{\frac{d}{2}} = x_1 + |x_1|\} \tag{3}$$

und ist durch ihren Schnittmeridian

$$2E(x_1^2 + x_2^2)^{\frac{d}{2}} = x_1 + |x_1| \tag{4}$$

in der  $x_1, x_2$ -Ebene hinreichend bestimmt.

Gleichung (4) ist für  $d = 2p$  ( $p \in \mathbb{N}^*$ ) eine inverse, monosymmetrische *Clairaut-Multiplikatrix* 2. Art vom Index  $2p - 1$  (vgl. die Monographien [5], §II, und [7], §V.11). Für  $d = 2p + 1$  liefert (4) durch Quadrieren ebenfalls algebraische Kurvengleichungen, nämlich in

$$2E^2(x_1^2 + x_2^2)^{2p+1} = x_1^2 + x_1|x_1| \tag{4*}$$

die Darstellung (jeweils eines Blattes) bisymmetrischer, inverser *Clairaut-Multiplikatrizen* 2. Art vom Index  $2p$  (siehe erneut [5] und [7]). Wir fassen (4) und (4\*) zusammen in

**Satz 1:** *Eine isophotische Elementchar*

$$\{(\mathbf{x}, \mathbf{u}) | \mathbf{x} \in \mathbb{R}^d; \mathbf{u} = -\mathbf{e}_1 = (-1, 0, \dots, 0)\}, \quad d \geq 2,$$

der Beleuchtungsstärke  $E > 0$  hat die  $x_1$ -Achse zur Symmetrale und ist durch ihre Meridianschnitte

$$2E^2(x_1^2 + x_2^2)^d = x_1^2 + x_1|x_1|$$

in der  $x_1, x_2$ -Ebene, also in der abgeschlossenen 2-Halbebene  $x_1 \geq 0$  liegende Blätter *Clairautscher Multiplikatrizen* mit Index  $d - 1$ , bestimmt. ■

Der Meridianschnitt im Fall  $d = 4$ , eine Quartik  $m_3$ , ist in Abbildung 1 dargestellt.

## 3. Isophotische Elementvereine

In diesem Abschnitt sollen isophotische 1-Streifen  $(\mathbf{x}(v_1), \mathbf{u}(v_1))$  bezüglich der Zentralbeleuchtung  $(q, I(\mathbf{n})) = (\mathbf{o}, 1)$  hergeleitet werden, deren Trägerkurven zu Kurven durch  $\mathbf{o}$

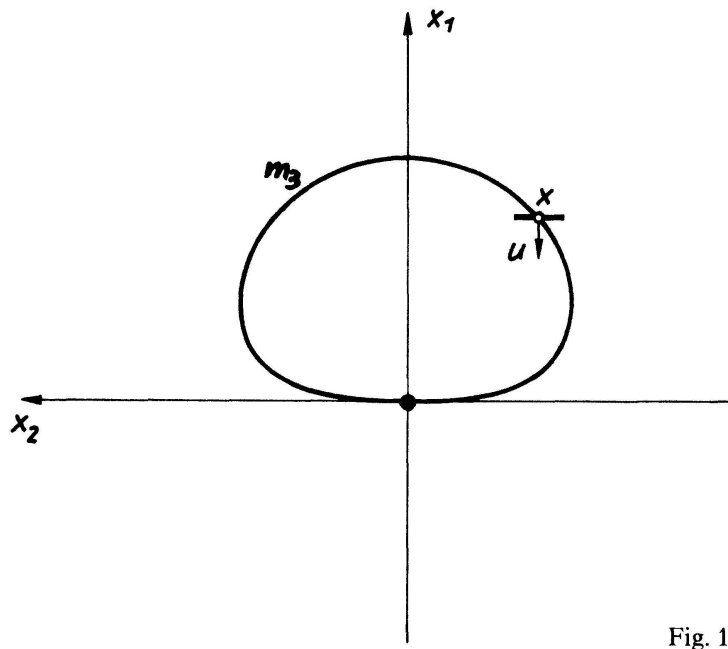


Fig. 1.

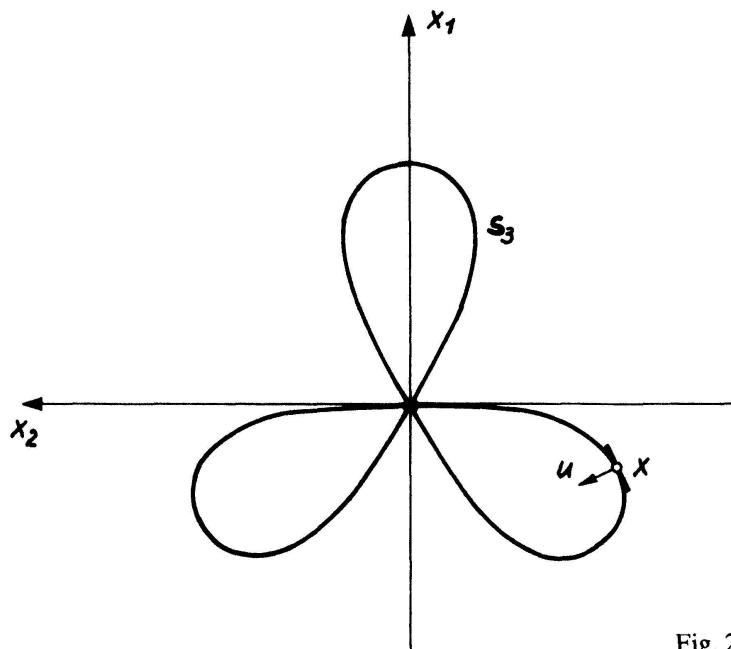


Fig. 2.

erweitert werden können und in einer 2-Ebene durch die Lichtquelle liegen. Die zugehörigen Stellungsvektoren  $u(v_1)$  werden parallel zu dieser 2-Ebene angenommen.

Demnach können wir uns auf die  $x_1, x_2$ -Ebene mit  $v_1 = \psi$  und variablem Einheitsvektor  $e = (\cos \psi, \sin \psi)$  beschränken. Sollen die gesuchten Trägerkurven in Parameterdarstellung

$$x(\psi) = r(\psi) \cdot e(\psi), \quad \|x\|^2 = r^2, \quad (5)$$

gegeben sein, dann sind Tangenten- und Normalenvektor von der Gestalt

$$\dot{x} = \dot{r}e + r\dot{e} \quad \text{bzw.} \quad \dot{x}^\perp = \dot{r}\dot{e} - re,$$

woraus unmittelbar  $\|\dot{\mathbf{x}}\|^2 = \|\dot{\mathbf{x}}^\perp\|^2 = r^2 + \dot{r}^2$  folgt. Für alle  $\psi$  in (5) wird nun gemäss (1)

$$E = \frac{\langle -\mathbf{x}, \mathbf{u} \rangle + |\langle -\mathbf{x}, \mathbf{u} \rangle|}{2 \|\mathbf{u}\| \cdot \|\mathbf{x}\|^d} = \text{const.}$$

angenommen. Dies führt auf

$$E^2 (r^2 + \dot{r}^2) r^{2d-4} = 1 \quad \text{und} \quad |\dot{r}| = \left| \frac{dr}{d\psi} \right| = \frac{1}{E r^{d-2}} \sqrt{1 - E^2 r^{2d-2}}. \tag{6}$$

Die Lösung der Differentialgleichung (6) liegt in ( $r = E^{\frac{1}{1-d}}$  oder)

$$(d - 1) |\psi - \psi_0| = \arccos(E r^{d-1})$$

vor, was nach Umformung

$$\cos(d - 1)(\psi - \psi_0) = E r^{d-1} \tag{7}$$

liefert.

Das ist die Polargleichung von regulären Äquipotentialkurven oder *Cassinoiden* mit Index  $d - 1$  (bzw. mit  $d - 1$  Brennpunkten) und Pol  $o$ . M.a.W. sind gerade jene Punkte der  $x_1, x_2$ -Ebene durch (7) beschrieben, deren jeweilige Abstände von den  $d - 1$  Ecken eines regulären, konvexen Polygons dieser Ebene ein Produkt ergeben, welches gleich der  $(d - 1)$ -fachen Potenz der Radiuslänge des Polygonumkreises ist (siehe [7], S. 446). Mithin gilt

**Satz 2:** *Ein 1-Streifen im  $\mathbb{R}^d$  der Gestalt*

$$\{(\mathbf{x}(v_1), \mathbf{u}(v_1)) | x_i = u_i = 0 \text{ für } i = 3, \dots, d\}$$

mit konstanter Beleuchtungsstärke  $E > 0$  hat als Trägerkurve in der  $x_1, x_2$ -Ebene (entweder einen Kreis oder) eine Cassinoide vom Index  $d - 1$  mit der auf die  $x_1$ -Achse bezogenen Polargleichung

$$\cos(d - 1)(\psi - \psi_0) = E r^{d-1}. \quad \blacksquare$$

Für den Spezialfall  $d = 3$  wurde dieser Zusammenhang bereits von Bohne [2] hergeleitet. Für  $d = 4$  ist der Meridianschnitt, eine als *Kiepert-Kurve* bekannte Cassinoide, in Abbildung 2 dargestellt. Die wesentliche Bedeutung der beschriebenen isophotischen 1-Streifen mit den in (7) für frei wählbare Integrationskonstante  $(d - 1)\psi_0$  gegebenen Trägerkurven und zu ihrer Träger-2-Ebene jeweils parallelen Stellungsvektoren besteht darin, dass aus Teilmengen von solchen Streifen (und einer Kugel mit Radius  $E^{\frac{1}{1-d}}$ ) durch geeignete Bewegungen mit Fixpunkt  $o$  weitere isophotische Elementvereine im  $E^d$ , z. B. glatte Drehflächen (vgl. [9]), erzeugt werden können. Dies sei jedoch dem Leser überlassen.

G. Geise, Sektion Mathematik, TU Dresden  
 H. Martini, Sektion Mathematik, PH Dresden

## LITERATUR

- 1 Bohne E.: Erzeugung isophotischer Streifen bei geometrischer Zentralbeleuchtung zweiter Art, wenn die Leitkurve eine Gerade ist. Beitr Algebra Geom. 13, 55–60 (1982).
- 2 Bohne E.: Spezielle ebene Kurven als Leitlinien isophotischer Zylinderstreifen. Beitr. Algebra Geom. 15, 91–95 (1983).
- 3 Bohne E., Geise, G.: Zur Begriffswelt der Beleuchtungsgeometrie. Beitr. Algebra Geom. 20, 117–122 (1985).
- 4 Caratheodory C.: Variationsrechnung und partielle Differentialgleichungen 1. Ordnung, Band 1. Teubner, Leipzig 1956.
- 5 de Jans C.: Les multiplicatrices de Clairaut. Gent 1912.
- 6 Lie S., Scheffers G.: Geometrie der Berührungsformationen, Band 1. Teubner, Leipzig 1896.
- 7 Loria G.: Spezielle algebraische und transzendente ebene Kurven, Band 1. Teubner, Leipzig 1910.
- 8 Meyer E.: Beleuchtungstechnik. Vieweg, Braunschweig 1938.
- 9 Paukowitsch P.: Flächen konstanter Beleuchtungsstärke. Beitr. Algebra Geom. 26, 203–216 (1988).

© 1991 Birkhäuser Verlag, Basel

0013-6018/91/030073-06\$1.50 + 0.20/0

## On permutations involving pairs of twins

We are concerned with permutations of a set of  $2n$  elements coupled into  $n$  pairs; the members of each pair are referred to as *twins* (two decks of cards serve as a model). Let  $p(n, k)$  be the probability that, in a randomly chosen permutation of such a set, exactly  $k$  pairs of twins are nonseparated (occupy neighbouring positions). To be more precise: assume  $S = \{a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_n, b_n\}$  is the set, element  $a_i$  matching  $b_i$ ; define  $T(n, k)$  as the set of all maps  $\varphi$  of  $\{1, \dots, 2n\}$  onto  $S$  such that  $|\varphi^{-1}(a_i) - \varphi^{-1}(b_i)| = 1$  holds for exactly  $k$  values of  $i$  (permutations regarded as enumerations). Then

$$p(n, k) = \frac{1}{(2n)!} |T(n, k)| \quad (0 \leq k \leq n)$$

(here and in the sequel  $|\cdot|$  denotes the cardinality of a set). Evidently,

$$\sum_{k=0}^n p(n, k) = 1 \quad \text{for } n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

It is not hard to show (see below) that  $p(n, 0) < 1/2$ , for any  $n$  (this was one of the problems at the 30-th IMO in Germany, 1989, proposed by the author).

In this note we examine the asymptotic behaviour of quantities  $p(n, k)$  for growing  $n$ . Namely, we prove

### Proposition

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p(n, k) = \frac{1}{e k!} \quad \text{for } k = 0, 1, 2, \dots$$