

Universität Bielefeld

Elementare Geometrie

Sommersemester 2018

Grundlagen

Fixpunkte und Kreisschnittpunkte

Stefan Witzel

Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Die Mittelsenkrechte von \overline{PQ} ist die Gerade ℓ , so dass $\sigma_\ell(P) = Q$ und $\sigma_\ell(Q) = P$, wobei σ_ℓ die Spiegelung an ℓ bezeichnet.

Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Seien A und A' die Schnittpunkte von P_Q und Q_P . Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. \diamond

Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Seien A und A' die Schnittpunkte von P_Q und Q_P . Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. \diamond

Was muss begründet werden?

- ▶ Wenn sich zwei Geraden schneiden sollen, dass sie nicht parallel sind.
- ▶ Wenn sich eine Gerade und ein Kreis schneiden sollen, dass das Kreisschnitt-Axiom 1 anwendbar ist.
- ▶ Wenn sich zwei Kreise schneiden sollen, dass das Kreisschnitt-Axiom 2 anwendbar ist.
- ▶ Wenn eine Gerade CD oder ein Kreis C_D konstruiert werden soll, dass C und D verschieden sind.
- ▶ Dass die Konstruktion leistet, was sie soll.

Axiom: M_p und N_q schneiden sich falls
 M_p einen Punkt innerhalb und einen Punkt
außerhalb von N_q enthält, und zwar
in jedem Halbraum von MN ^{genau} einmal.

Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Seien A und A' die Schnittpunkte von P_Q und Q_P . Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. \diamond

Begründung. Sei Q' der von Q verschiedene Schnittpunkt von PQ und P_Q . Dann gilt



$$|QQ| < |QP| < |QQ'|$$



denn es ist $|QQ| = 0$ und $|QQ'| = 2|QP|$.

Da Q und Q' auf dem Kreis P_Q liegen, zeigt das, dass P_Q einen Punkt innerhalb von Q_P und einen Punkt außerhalb von Q_P enthält.

Nach dem Kreisschnitt-Axiom schneiden sich P_Q und Q_P in jedem Halb-
raum von PQ in einem Punkt A bzw. A' . Da

$$|PA| + |AQ| = 2|PQ| > |PQ| \quad \left(\text{und} \quad \begin{array}{l} |AP| + |PQ| = 2|PQ| > |AQ| \\ |PQ| + |QA| = 2|PQ| > |PA| \end{array} \right)$$

ist, liegt A nicht auf PQ und die Punkte A und A' sind verschieden.

[...]



Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Seien A und A' die Schnittpunkte von P_Q und Q_P . Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. \diamond

Begründung. [...]

Weil A und A' verschieden sind, existiert die Gerade AA' . Weil A und A' auf $P_Q \cap Q_P$ liegen, ist

$$|PA| = |PA'| = |QA| = |QA'|.$$

Das heißt P und Q sind die beiden Schnittpunkte von A_P und A'_P . Insbesondere liegen P und Q nicht auf ℓ .

Da σ_ℓ Spiegelung an ℓ ist, hat der Punkt $\sigma_\ell(P)$ den gleichen Abstand von A und A' , wie P .

Da P nicht auf ℓ liegt, ist $\sigma_\ell(P) \neq P$. Der einzige Punkt außer P , der den gleichen Abstand von A und A' hat, wie P ist Q . Also ist $\sigma_\ell(P) = Q$. Durch Vertauschen der Rollen von P und Q sieht man, dass auch $\sigma_\ell(Q) = P$. \square

Wie schreib ich's auf? (Version 1)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Seien A und A' die Schnittpunkte von PQ und Q_P . Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. \diamond

Folgerung. Es gibt einen Punkt $M \in \overline{PQ}$ mit $|PM| = |MQ| = \frac{1}{2}|PQ|$.

Beweis. Da A und A' in unterschiedlichen Halbräumen von PQ liegen, haben $\overline{AA'}$ und PQ einen Schnittpunkt M .

Da $M \in \ell$, ist $\sigma_\ell(M) = M$. Also ist $|PM| = |\sigma_\ell(P)\sigma_\ell(M)| = |QM|$.

Da $M \in PQ$ muss eine der Dreiecksungleichungen zwischen P , Q und M mit Gleichheit gelten.

Die einzige Möglichkeit dafür ist $|PQ| = |PM| + |MQ|$. \square

Kreisschnittpunkte

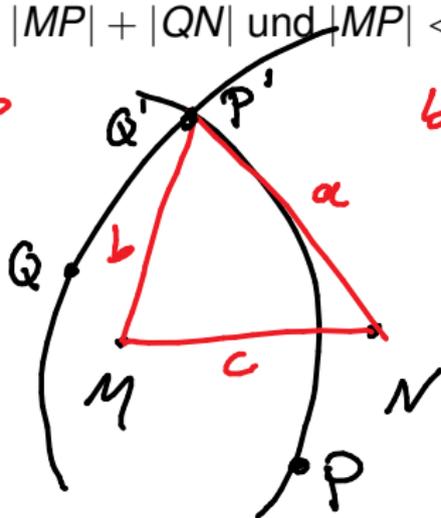
Satz. Die Kreise M_P und N_Q haben

1. keinen Schnittpunkt wenn $|QN| > |PM| + |MN|$ oder $|MN| > |MP| + |QN|$ oder $|MP| > |MN| + |NQ|$,
2. genau einen Schnittpunkt (Berührungspunkt) wenn $|QN| = |PM| + |MN|$ oder $|MN| = |MP| + |QN|$ oder $|MP| = |MN| + |NQ|$,
3. genau zwei Schnittpunkte wenn $|QN| < |PM| + |MN|$ und $|MN| < |MP| + |QN|$ und $|MP| < |MN| + |NQ|$.

$$c < a + b$$

$$b < a + c$$

$$a < b + c$$



Kreisschnittpunkte

Satz. Die Kreise M_P und N_Q haben

1. keinen Schnittpunkt wenn $|QN| > |PM| + |MN|$ oder $|MN| > |MP| + |QN|$ oder $|MP| > |MN| + |NQ|$,
2. genau einen Schnittpunkt (Berührungspunkt) wenn $|QN| = |PM| + |MN|$ oder $|MN| = |MP| + |QN|$ oder $|MP| = |MN| + |NQ|$,
3. genau zwei Schnittpunkte wenn $|QN| < |PM| + |MN|$ und $|MN| < |MP| + |QN|$ und $|MP| < |MN| + |NQ|$.

Folgerung. Die Kreise M_{PR} und N_{QS} haben

1. keinen Schnittpunkt wenn $|QS| > |PR| + |MN|$ oder $|MN| > |RP| + |QS|$ oder $|RP| > |MN| + |SQ|$,
2. genau einen Schnittpunkt (Berührungspunkt) wenn $|QS| = |PR| + |MN|$ oder $|MN| = |RP| + |QS|$ oder $|RP| = |MN| + |SQ|$,
3. genau zwei Schnittpunkte wenn $|QS| < |PR| + |MN|$ und $|MN| < |RP| + |QS|$ und $|RP| < |MN| + |SQ|$.

Kreisschnittpunkte

Satz. Die Kreise M_P und N_Q haben

1. keinen Schnittpunkt wenn $|QN| > |PM| + |MN|$ oder $|MN| > |MP| + |QN|$ oder $|MP| > |MN| + |NQ|$.

Beweis. Für einen Schnittpunkt S ist $|SM| = |PM|$ und $|SN| = |QN|$. Die Behauptung folgt also aus der Dreiecksungleichung. □

Kreisschnittpunkte

Satz. Die Kreise M_P und N_Q haben

2.,3. zwei Schnittpunkte wenn $|QN| \leq |PM| + |MN|$ und
 $|MN| \leq |MP| + |QN|$ und $|MP| \leq |MN| + |NQ|$,

die gleich sind wenn in einer der Ungleichungen Gleichheit gilt.

Beweis. Wir können P durch den Schnittpunkt von M_P mit \overrightarrow{MN} und Q durch den Schnittpunkt von N_Q mit \overrightarrow{QP} ersetzen. 

Nennen wir P' bzw. Q' jeweils den zweiten Schnittpunkt von M_P bzw. N_Q mit MN .

Wir lesen die Punkte entlang MN so, dass M links von N ist. Nach Konstruktion ist P' links von P und Q links von Q' .

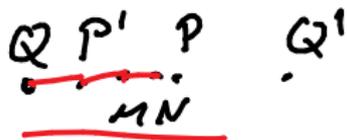
Wir wollen zeigen, dass die Punkte P', Q, P, Q' in dieser Reihenfolge angeordnet sind (wobei eventuell $P' = Q$ bzw. $Q = P$ bzw. $P = Q'$ ist).

Dann enthält M_P einen Punkt innerhalb von N_Q (nämlich P) und einen Punkt außerhalb von N_Q (nämlich P') und die Kreise schneiden sich nach dem Kreisschnittaxiom.

[...]



Kreisschnittpunkte



Satz. Die Kreise M_P und N_Q haben

2.,3. zwei Schnittpunkte wenn $|QN| \leq |PM| + |MN|$ und
 $|MN| \leq |MP| + |QN|$ und $|MP| \leq |MN| + |NQ|$,

die gleich sind wenn in einer der Ungleichungen Gleichheit gilt.

Beweis. [...]

Die Anordnungen die wir ausschließen wollen sind Q, P', P, Q' ,
 P', Q, Q', P und P', P, Q, Q' .

In der ersten Anordnung ist entweder $|QN| = |QP'| + |P'M| + |MN| \geq$
 $|P'M| + |MN|$ oder $|NQ'| = |NM| + |MP| + |PQ'| \geq |NM| + |MP|$. Nach der
Voraussetzung gilt jeweils Gleichheit und damit $Q = P'$ bzw. $P = Q'$.

In der zweiten Anordnung ist entweder $|P'M| = |P'Q| + |QN| + |NM| \geq$
 $|QN| + |NM|$ oder $|MP| = |MN| + |NQ'| + |Q'P| \geq |MN| + |NQ'|$. Nach der
Voraussetzung gilt jeweils Gleichheit und damit $P' = Q$ bzw. $Q' = P$.

In der dritten Anordnung ist $|MN| = |MP| + |PQ| + |QN| \geq |MP| + |QN|$.
Nach der Voraussetzung gilt Gleichheit, also $P = Q$. □

Wie schreib ich's auf? (Version 2)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Wie schreib ich's auf? (Version 2)

Aufgabe. Gegeben ein Segment \overline{PQ} , konstruiere die Mittelsenkrechte.

Konstruktionsbeschreibung. Sei \underline{R} so, dass $|PR| > \frac{1}{2}|PQ|$. Seien A und A' die Schnittpunkte von $\underline{P_R}$ und $\underline{Q_{PR}}$. Die Gerade $\ell = AA'$ ist die Mittelsenkrechte. ◇

Begründung. (Den Punkt R kann man zum Beispiel nach dem Axiom „Punkte und Geraden“ aus $\overrightarrow{PQ} \setminus \overline{PQ}$ wählen.)

Es ist

$$|PR| + |PR| = 2|PR| > |PQ| \quad \text{und} \quad |PR| + |PQ| > |PR|,$$

also folgt aus dem Satz, dass sich die Kreise $P_R (= P_{PR})$ und Q_{PR} in zwei verschiedenen Punkten A und A' schneiden.

[ab hier wie gehabt ...]



Parallelität

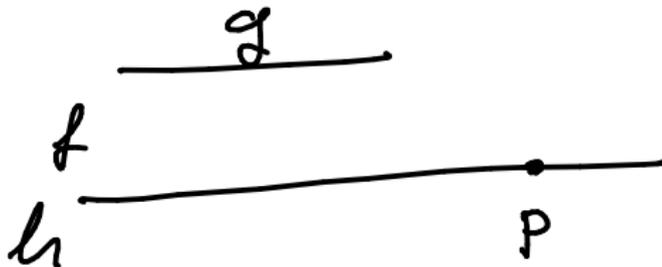
Proposition. Wenn $f \parallel g$ und $g \parallel h$, dann ist $f \parallel h$.

Parallelität

Proposition. Wenn $f \parallel g$ und $g \parallel h$, dann ist $f \parallel h$.

Beweis. Wenn $f = g$ oder $g = h$ ist die Aussage trivial, also nehmen wir an, dass $f \neq g \neq h$.

Angenommen f und h schneiden sich in einem Punkt P . Dann ist f die eindeutige Parallele zu g durch P . Dasselbe gilt für h . Also ist $f = h$. \square



Punkte konstruieren

Wir spielen folgendes Spiel:

- ▶ Wir beginnen mit einer Menge von Punkten.
- ▶ In jedem Schritt dürfen wir zwei der Punkte P und Q der Menge auswählen und die Gerade PQ der Menge hinzufügen.
- ▶ Ziel ist es, einen gegebenen Punkt Z zur Menge hinzuzufügen.

Punkte konstruieren

Wir spielen folgendes Spiel:

- ▶ Wir beginnen mit einer Menge von Punkten.
- ▶ In jedem Schritt dürfen wir zwei der Punkte P und Q der Menge auswählen und die Gerade PQ der Menge hinzufügen.
- ▶ Ziel ist es, einen gegebenen Punkt Z zur Menge hinzuzufügen.

Proposition. Wenn unsere Ausgangsmenge aus drei nicht kollinearen Punkten besteht, können wir jeden beliebigen Punkt Z nach höchstens drei Schritten zu unserer Menge hinzufügen.

Punkte konstruieren

Wir spielen folgendes Spiel:

- ▶ Wir beginnen mit einer Menge von Punkten.
- ▶ In jedem Schritt dürfen wir zwei der Punkte P und Q der Menge auswählen und die Gerade PQ der Menge hinzufügen.
- ▶ Ziel ist es, einen gegebenen Punkt Z zur Menge hinzuzufügen.

Proposition. Wenn unsere Ausgangsmenge aus drei nicht kollinearen Punkten besteht, können wir jeden beliebigen Punkt Z nach höchstens drei Schritten zu unserer Menge hinzufügen.

Beweis. Sei g irgendeine Gerade durch Z , die nicht P , Q oder R enthält. Sie ist parallel zu höchstens einer der drei Geraden PQ , QR und PR : Wäre $g \parallel PQ$ und $g \parallel QR$, dann wäre $PQ \parallel QR$, das ist aber nicht der Fall. Sagen wir, g ist weder parallel zu PQ noch zu PR .

Punkte konstruieren

Wir spielen folgendes Spiel:

- ▶ Wir beginnen mit einer Menge von Punkten.
- ▶ In jedem Schritt dürfen wir zwei der Punkte P und Q der Menge auswählen und die Gerade PQ der Menge hinzufügen.
- ▶ Ziel ist es, einen gegebenen Punkt Z zur Menge hinzuzufügen.

Proposition. Wenn unsere Ausgangsmenge aus drei nicht kollinearen Punkten besteht, können wir jeden beliebigen Punkt Z nach höchstens drei Schritten zu unserer Menge hinzufügen.

Beweis. Sei g irgendeine Gerade durch Z , die nicht P , Q oder R enthält. Sie ist parallel zu höchstens einer der drei Geraden PQ , QR und PR : Wäre $g \parallel PQ$ und $g \parallel QR$, dann wäre $PQ \parallel QR$, das ist aber nicht der Fall. Sagen wir, g ist weder parallel zu PQ noch zu PR .

Schritt 1: füge PQ der Menge hinzu, Schritt 2: füge PR der Menge hinzu. Füge $ST = g$ der Menge hinzu, wobei $\{S\} = g \cap PQ$ und $\{T\} = g \cap PR$. (Merke: $S \neq T$ weil sich PQ und PR in P schneiden und $P \notin g$.) □

Unterräume, Fixpunkte

Eine Teilmenge von \mathbb{E}^2 ist ein **Unterraum**, wenn gilt: liegen P und Q in der Menge und liegt R auf PQ liegt, dann liegt auch R in der Menge.

Folgerung. Wenn ein Unterraum drei nicht kollineare Punkte enthält, ist er bereits die ganze Ebene.

Beweis. Jeder Punkt Z den wir mit unserem Spiel erreichen können, ist in einem Unterraum bereits enthalten. Wir haben gesehen, dass das für jeden Punkt gilt. □

Unterräume, Fixpunkte

Eine Teilmenge von \mathbb{E}^2 ist ein **Unterraum**, wenn gilt: liegen P und Q in der Menge und liegt R auf PQ liegt, dann liegt auch R in der Menge.

Folgerung. Wenn ein Unterraum drei nicht kollineare Punkte enthält, ist er bereits die ganze Ebene.

Beweis. Jeder Punkt Z den wir mit unserem Spiel erreichen können, ist in einem Unterraum bereits enthalten. Wir haben gesehen, dass das für jeden Punkt gilt. □

Folgerung. Ein Unterraum ist entweder leer, ein einziger Punkt, eine Gerade, oder die ganze Ebene.

Unterräume, Fixpunkte

Eine Teilmenge von \mathbb{E}^2 ist ein **Unterraum**, wenn gilt: liegen P und Q in der Menge und liegt R auf PQ liegt, dann liegt auch R in der Menge.

Folgerung. Wenn ein Unterraum drei nicht kollineare Punkte enthält, ist er bereits die ganze Ebene.

Beweis. Jeder Punkt Z den wir mit unserem Spiel erreichen können, ist in einem Unterraum bereits enthalten. Wir haben gesehen, dass das für jeden Punkt gilt. □

Folgerung. Ein Unterraum ist entweder leer, ein einziger Punkt, eine Gerade, oder die ganze Ebene.

Proposition. Die Fixpunktmenge einer Bewegung φ ist entweder leer, ein einziger Punkt, eine Gerade, oder die ganze Ebene.

Unterräume, Fixpunkte

Eine Teilmenge von \mathbb{E}^2 ist ein **Unterraum**, wenn gilt: liegen P und Q in der Menge und liegt R auf PQ liegt, dann liegt auch R in der Menge.

Folgerung. Wenn ein Unterraum drei nicht kollineare Punkte enthält, ist er bereits die ganze Ebene.

Beweis. Jeder Punkt Z den wir mit unserem Spiel erreichen können, ist in einem Unterraum bereits enthalten. Wir haben gesehen, dass das für jeden Punkt gilt. □

Folgerung. Ein Unterraum ist entweder leer, ein einziger Punkt, eine Gerade, oder die ganze Ebene.

Proposition. Die Fixpunktmenge einer Bewegung φ ist entweder leer, ein einziger Punkt, eine Gerade, oder die ganze Ebene.

Beweis. Schritt 1: die Fixpunktmenge von φ ist ein Unterraum.

Schritt 2: Wende die letzte Folgerung an. □