

# Vom Strahlensatz zum Strahlensatz

## Arbeitstagung SLA 1

PH St. Gallen, 14. November 2015

[www.walser-h-m.ch/hans/Vortraege/Vortrag89\\_3](http://www.walser-h-m.ch/hans/Vortraege/Vortrag89_3)

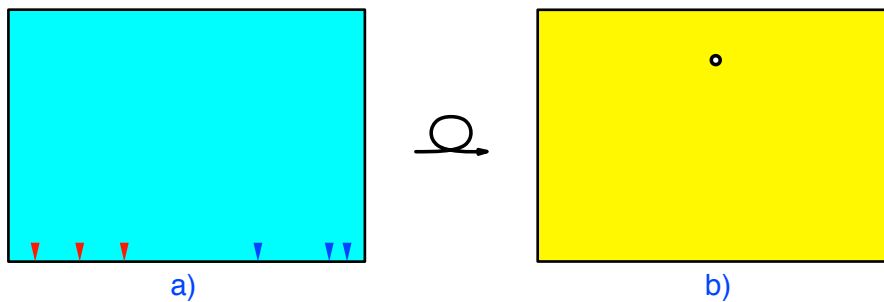
### Zusammenfassung

Ein Faltspiel und ein Spiel mit rechten Winkelhaken führen beide zu einem symmetrischen Phänomen, welches im Lehrplan nicht kodifiziert ist. Der (asymmetrische) Strahlensatz erweist sich als Grenzfall.

Die Überlegungen wurden angeregt durch einen didaktischen Fehler in einem Arbeitsblatt für das 8. Schuljahr.

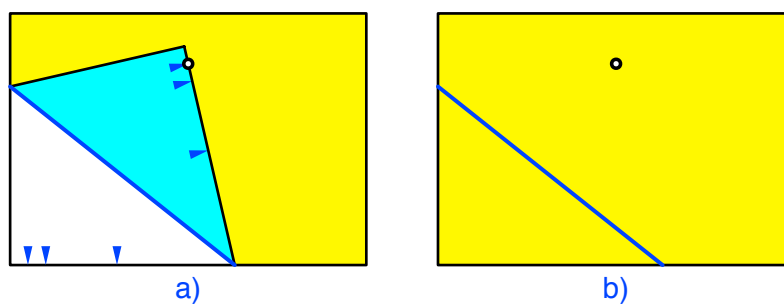
### 1 Faltschritt

Auf der Rückseite eines Blattes (Querformat) tragen wir am unteren Rand zwei mal drei Marken ein (Abb. 1a). Dann wenden wir das Blatt und wählen einen Punkt (Abb. 1b).



**Abb. 1: Zwei mal drei Marken. Punkt wählen**

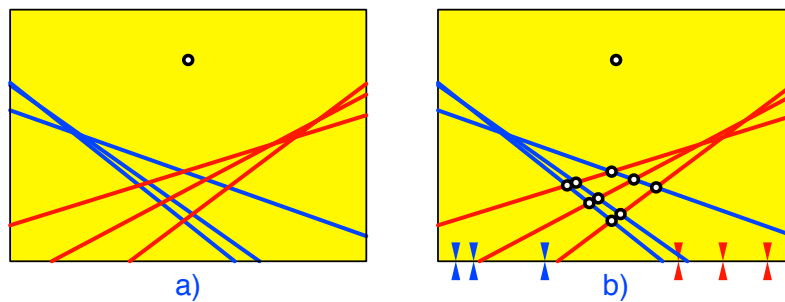
Nun falten wir die erste Markierung auf den Punkt ein und wieder zurück (Abb. 2).



**Abb. 2: Erster Faltschritt**

Nun falten wir die zweite, dritte, ... Markierung auf den Punkt ein und wieder zurück.

So erhalten wir zwei Scharen von je drei Faltschritten (Abb. 3a). Die wechselseitigen Schnittpunkte teilen jeweils auf jeder Schar im gleichen Verhältnis (Abb. 3b). Das ist auch das Verhältnis der ursprünglich gewählten Marken (Abb. 1a).

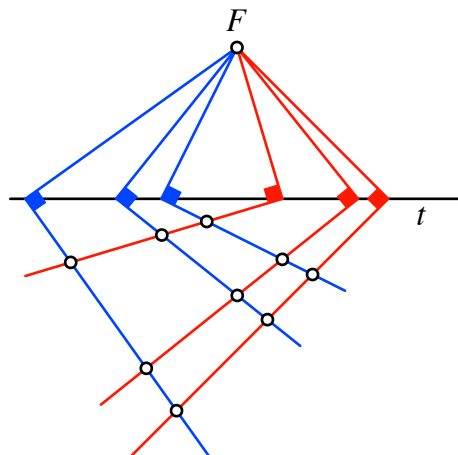


**Abb. 3: Falllinien. Teilverhältnisse**

Diese Situation erinnert an den Strahlensatz. In der Strahlensatzfigur haben wir aber einerseits eine Schar von parallelen Geraden und andererseits eine Schar von Geraden durch einen Punkt. Das sind begrifflich asymmetrische Vorgaben. Die Satzaussage ist aber symmetrisch: in beiden Geradenscharen sind je entsprechende Teilverhältnisse gleich. Die Fallfigur der Abbildung 3b ist begrifflich symmetrisch.

## 2 Winkeleisen

Ebenso erhalten wir eine begrifflich symmetrische Figur mit „Winkeleisen“, wie sie von Handwerkern verwendet werden. Dazu beginnen wir mit einem Punkt  $F$  und einer nicht durch  $F$  verlaufenden Geraden  $t$ . Nun passen wir gemäß Abbildung 4 zwei Sets von je drei rechten Winkeln (rote und blaue „Winkeleisen“) ein so, dass die Scheitel der rechten Winkel auf  $t$  liegen und jeweils ein Schenkel durch  $F$  verläuft. Die anderen Schenkel schneiden sich wechselseitig.



**Abb. 4: Winkeleisen**

Diese Schnittpunkte unterteilen die roten Schenkel im gleichen Verhältnis. Im Beispiel der Abbildung 4 ist es das Verhältnis 2:1. Ebenso unterteilen sie die blauen Schenkel im gleichen Verhältnis. Im Beispiel der Abbildung 4 ist es das Verhältnis 5:2.

Wir sind geneigt in unserem Anschauungsraum die Figur räumlich zu interpretieren. Dann allerdings haben wir das Gefühl, dass die auf uns zukommende Ebene nach unten hängt. Das hängt damit zusammen, dass die Figur *keine* perspektivische Darstellung ist.

Für den Beweis legen wir ein Koordinatensystem gemäß der Abbildung 5 zugrunde. Als  $x$ -Achse wählen wir die Gerade  $t$ . Der Punkt  $F$  habe die Koordinaten  $F(0, 1)$ . Wir wählen exemplarisch einen roten Winkel mit dem Scheitelpunkt  $(a, 0)$  und einen blauen Winkel mit dem Scheitelpunkt  $(b, 0)$ .

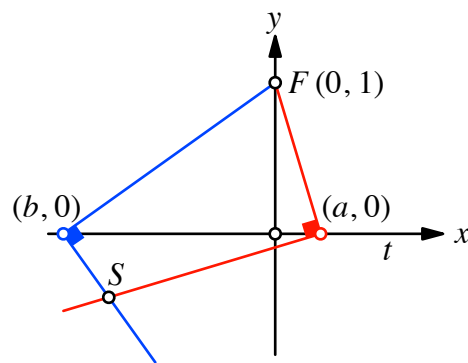


Abb. 5: Koordinaten

Der zweite rote Schenkel hat die Gleichung  $y = ax - a^2$ , der zweite blaue Schenkel die Gleichung  $y = bx - b^2$ . Für den Schnittpunkt  $S$  der beiden Schenkel ergeben sich die Koordinaten  $S(a+b, ab)$ . Summe und Produkt, die beiden einfachen Gottesgaben.

Die drei roten Winkel und die drei blauen Winkel der Abbildung 1 nummerieren wir mit  $i \in \{1,2,3\}$  beziehungsweise  $j \in \{1,2,3\}$ . Die Scheitel dieser Winkel seien bei  $(a_i, 0)$  beziehungsweise  $(b_j, 0)$ .

Der Punkt  $S_{ij}$  als Schnittpunkt des  $i$ -ten roten Schenkels mit dem  $j$ -ten blauen Schenkel hat die Koordinaten  $S_{ij}(a_i + b_j, a_i b_j)$ .

Nun berechnen wir das Teilverhältnis auf dem  $i$ -ten roten Schenkel:

Für die Strecke  $\overline{S_{i1}S_{i2}}$  erhalten wir:

$$\begin{aligned}\overline{S_{i1}S_{i2}} &= \sqrt{((a_i + b_2) - (a_i + b_1))^2 + (a_i b_2 - a_i b_1)^2} = \sqrt{(b_2 - b_1)^2 + a_i^2 (b_2 - b_1)^2} \\ &= |b_2 - b_1| \sqrt{1 + a_i^2}\end{aligned}$$

Analog ergibt sich für die Strecke  $\overline{S_{i2}S_{i3}}$ :

$$\overline{S_{i2}S_{i3}} = |b_3 - b_2| \sqrt{1 + a_i^2}$$

Bei der Verhältnisbildung kürzt sich der Wurzelfaktor heraus:

$$\overline{S_{i1}S_{i2}} : \overline{S_{i2}S_{i3}} = |b_2 - b_1| : |b_3 - b_2|$$

Wir sehen, dass das Teilverhältnis unabhängig vom Index  $i$  ist, das heißt, es ist auf allen roten Schenkeln gleich. Es ist zudem gleich dem Teilverhältnis der Scheitel der drei blauen Winkel.

Aus Symmetriegründen gilt das Analoge für die Teilverhältnisse auf den blauen Schenkeln.

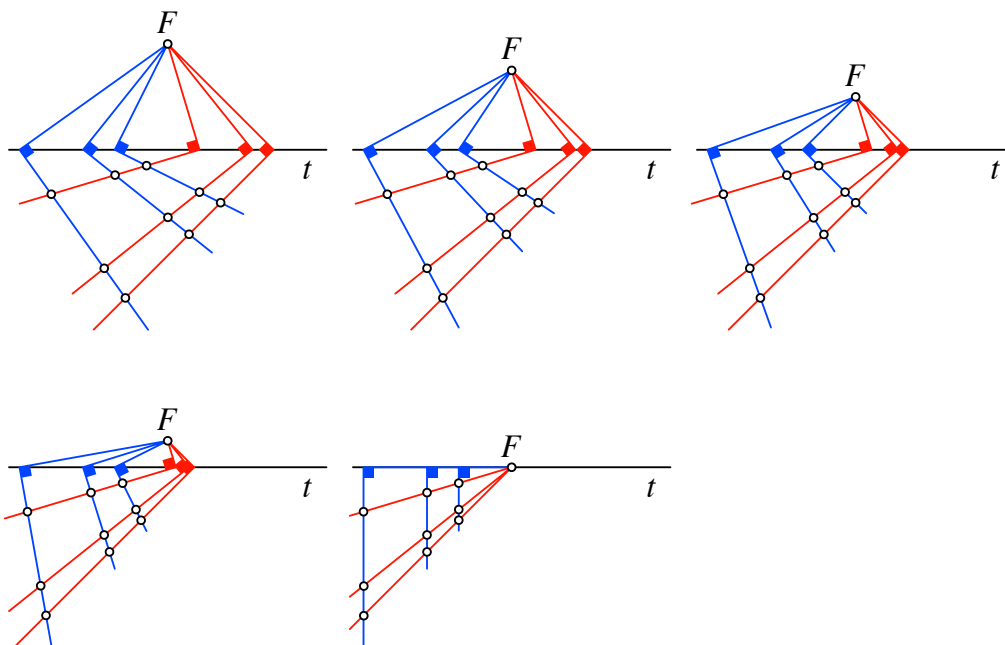
### 3 Link zum Strahlensatz

Wir modifizieren die Figur der Abbildung 4, indem wir mit dem Punkt  $F$  gegen die Gerade  $t$  streben.

Die beiden Winkelscharen behandeln wir aber ungleich, um die für den Strahlensatz nötige Asymmetrie zu erreichen. Bei den blauen Winkeln lassen wir die Scheitelpunkte auf  $t$  fest. Diese Winkel werden also gedreht. Bei den roten Winkeln lassen wir die Richtungen fest. Diese Winkel werden parallel verschoben.

Da die Teilverhältnisse bei den Winkelscheiteln sich nicht verändern, bleiben auch die Teilverhältnisse auf den Schenkeln invariant.

Die Abbildung 6 illustriert diesen Modifikationsprozess in mehreren Schritten. Im Grenzfall mit  $F$  auf  $t$  stehen die blauen Schenkel senkrecht auf  $t$ , sind also untereinander parallel. Die roten Schenkel verlaufen durch  $F$ . Wir haben den gewöhnlichen Strahlensatz.



**Abb. 6: Modifikation**

### 4 Motivation

Auf einem Arbeitsblatt (8. Schuljahr) ist zu lesen:

#### Eigenschaften der Trapeze

- Jedes Trapez hat ein Paar gegenüberliegender paralleler Seiten.
- Beide Mittellinien halbieren sich.

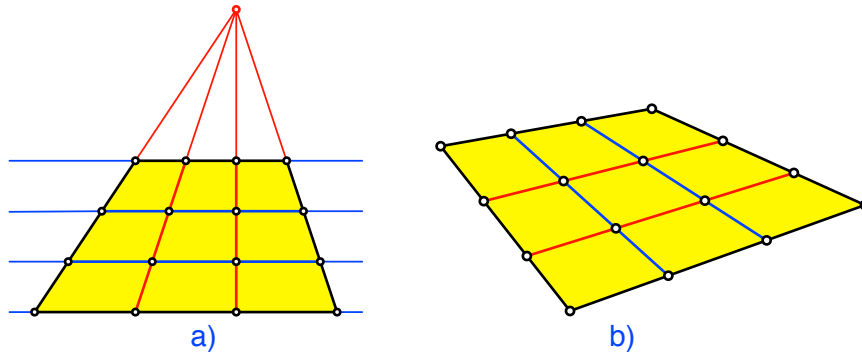
Das wurde moniert, das sei zwar fachlich richtig, aber didaktisch falsch. Die erste Zeile sei definierend für die Trapeze, die zweite Zeile gelte aber für jedes Viereck (Abb. 12a). Vielleicht sollte hier speziell auf die Mittellinien hingewiesen werden, weil eine davon nachher für die Flächenformel gebraucht wird.

Dieser didaktische „Fehler“ erwies sich als sehr anregend: was ist, wenn *Mitte* und *halbieren* durch *Drittel* und *dritteln* ersetzt wird?

### 5 Dritteln

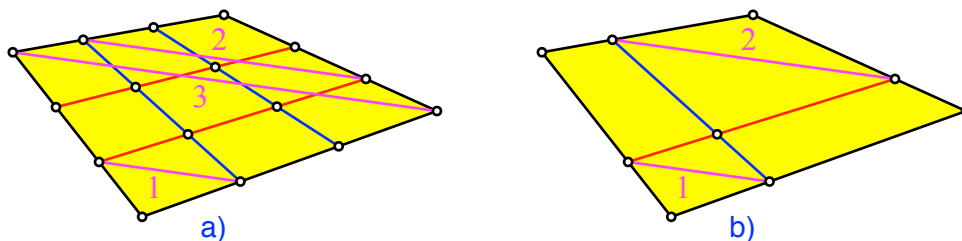
Dritteln sich Drittellinien gegenseitig?

Der Sonderfall des Trapezes erweist sich als einfach, da wir den Strahlensatz anwenden können (Abb. 7a).



**Abb. 7: Sonderfall Trapez. Allgemeines Viereck**

Wir vermuten aufgrund der Zeichnung (Abb. 7b), dass sich auch im allgemeinen Fall die Drittellinien gegenseitig dritteln. Dies kann gemäß einer Mitteilung von H. H., W., wie folgt gezeigt werden (Abb. 8).

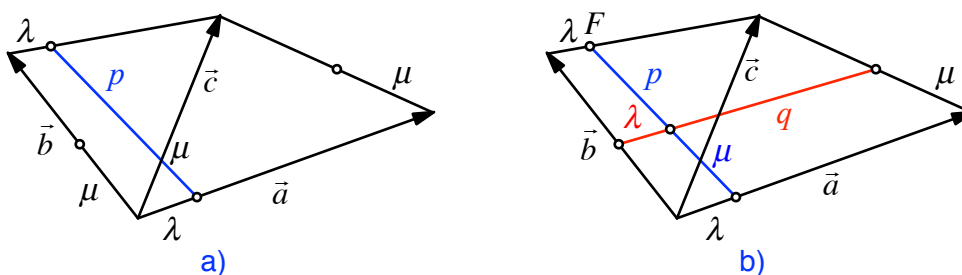


**Abb. 8: Beweisfigur**

Wir führen gemäß Abbildung 8a eine Diagonale und dazu parallele Strecken ein. Diese haben auf Grund des Strahlensatzes die angegebenen Längenverhältnisse. Die Abbildung 8b zeigt, dass diese zur Drittelung beim angegebenen Punkt führt. Für die anderen Schnittpunkte im Viereck kann analog überlegt werden. — Nun ist es allerdings so, dass diese Idee nicht auf Viertlung, Fünftelung, ... übertragen werden kann.

### 6 Beweis für den allgemeinen Fall

Wir teilen zwei gegenüberliegende Seiten des Vierecks im Verhältnis  $\lambda$ , die beiden anderen Seiten im Verhältnis  $\mu$ . Wir verbinden dann die Teilpunkte gegenüberliegender Seiten. Zu zeigen ist: diese Verbindungslinien teilen sich gegenseitig in den Verhältnissen  $\lambda$  und  $\mu$ . Wir verwenden die Bezeichnungen der Abbildung 9.



**Abb. 9: Beweisidee**

Für die eingezeichnete blaue Strecke  $p$  erhalten wir die Parameterdarstellung:

$$t \mapsto \lambda \vec{a} + t \vec{b} + \lambda t (\vec{c} - \vec{a} - \vec{b}), \quad t \in [0,1]$$

Für die eingezeichnete rote Strecke  $q$  erhalten wir die Parameterdarstellung:

$$s \mapsto s \vec{a} + \mu \vec{b} + s \mu (\vec{c} - \vec{a} - \vec{b}), \quad s \in [0,1]$$

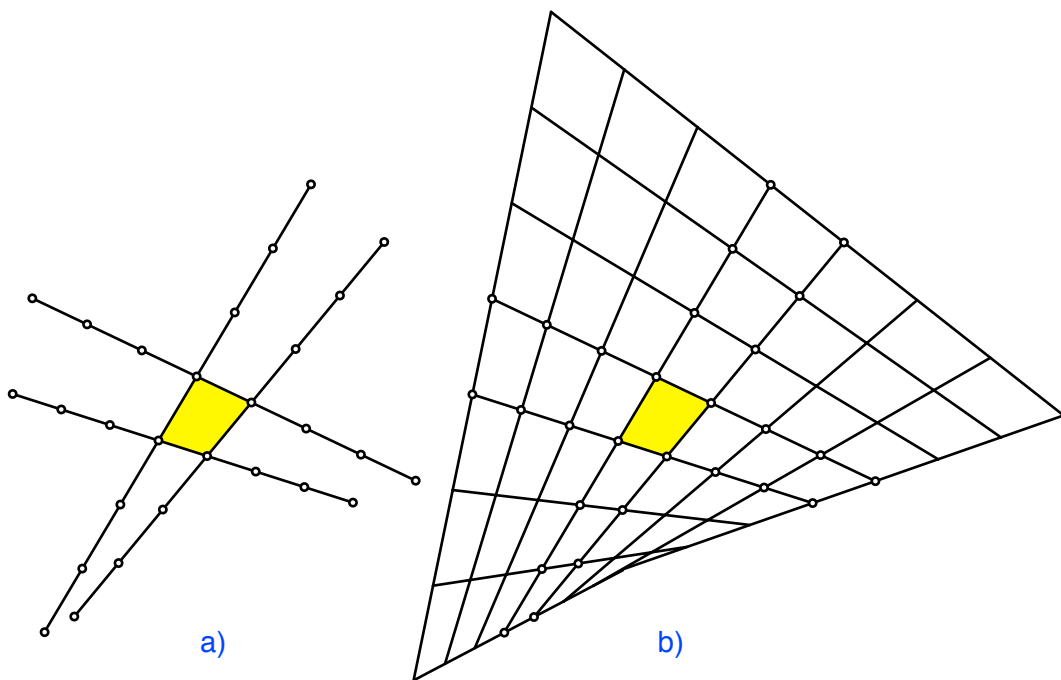
Der Schnittpunkt ergibt sich offensichtlich für  $s = \lambda$  und  $t = \mu$ . Das war zu zeigen.

Bemerkung 1: Der Vektor  $(\vec{c} - \vec{a} - \vec{b})$  misst die Abweichung des Viereckes vom Parallelogramm. Im Parallelogramm ist die Teilverhältniseigenschaft trivial.

Bemerkung 2: Die Einschränkungen  $t \in [0,1]$  und  $s \in [0,1]$  beziehen sich auf die eingezeichneten Strecken, sind aber für den Beweisgang unerheblich. Sie werden im Folgenden weggelassen.

## 7 Viereckraster

Für ganze Zahlen  $\lambda$  und  $\mu$  erhalten wir ein Viereckraster wie folgt. Wir verlängern die Viereckseiten und tragen Vielfache der Seitenlängen ab (Abb. 10a).



**Abb. 10: Erster Schritt. Ergänzung zum Viereckraster**

Anschließend ergänzen wir zum Viereckraster (Abb. 10b). Jede Rasterlinie der einen Schar wird von den Rasterlinien der anderen Schar in gleichmäßigen Abständen geschnitten.

Wir sehen, dass sich beim Überschneiden der Linien was Spannendes anbahnt.

## 8 Parabel

Wenn wir das Viereckraster fortsetzen, überschneiden sich die Rasterlinien. Als Enveloppe entsteht eine Kurve (Abb. 11). Die Kurve sieht aus wie eine Parabel, es könnte aber auch eine Ellipse sein. Was nun?

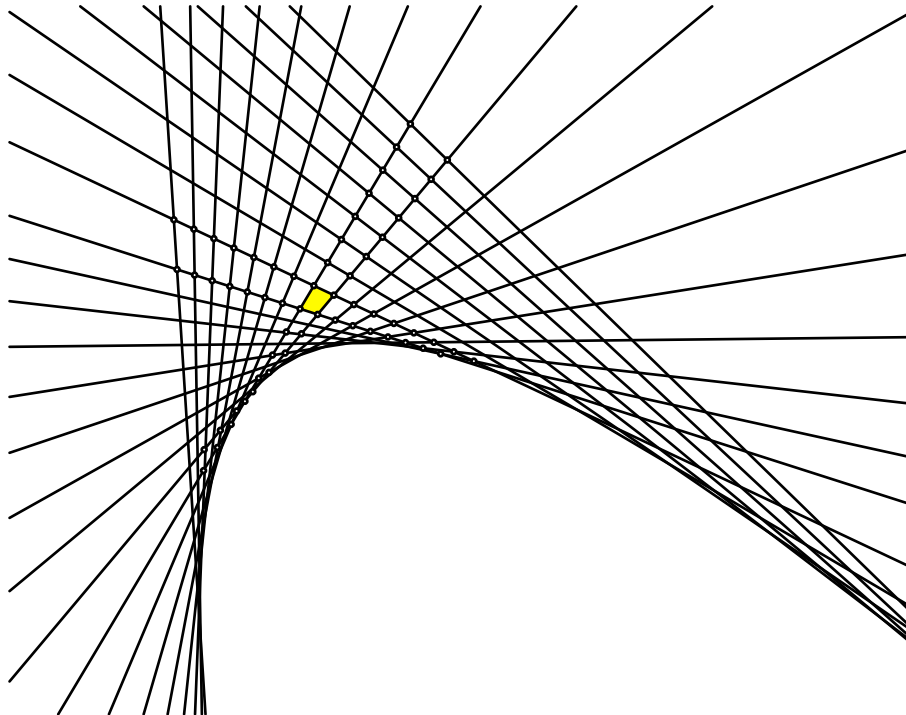


Abb. 11: Parabel

## 9 Sichtumkehr: Beginn mit Parabel

Wir zeichnen zweimal drei Tangenten an eine Parabel und bestimmen exemplarisch die Teilverhältnisse zwischen den wechselseitigen Schnittpunkten (Abb. 12).

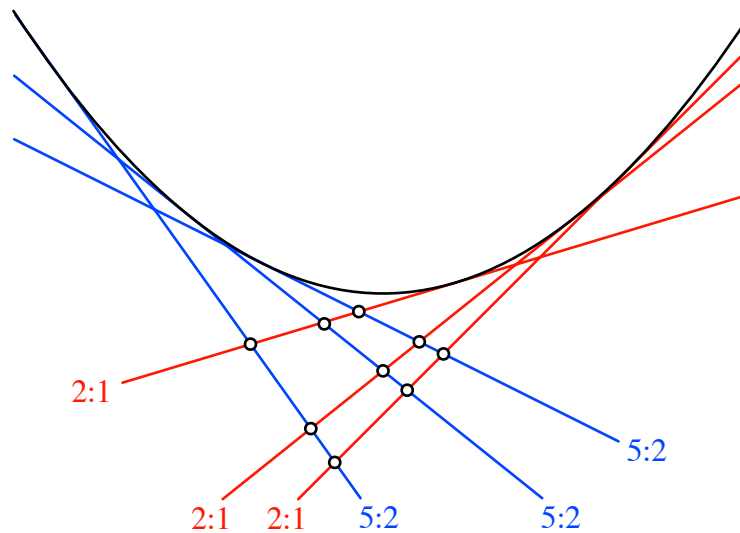


Abb. 12: Tangenten an Parabel

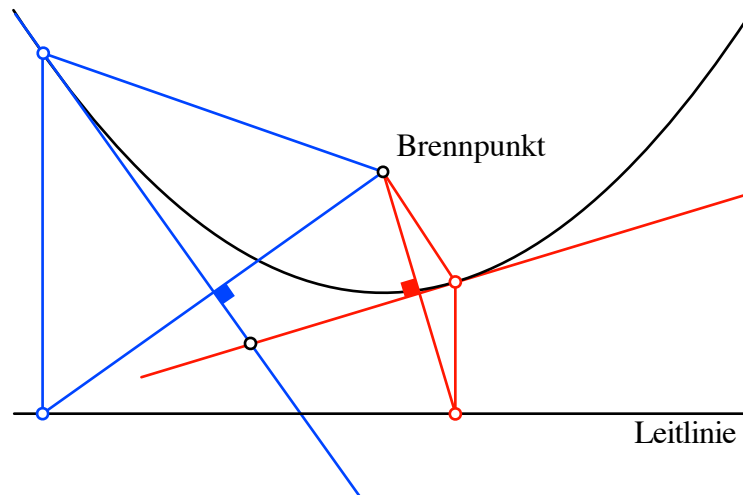
Wenn wir dasselbe Spielchen mit einem Kreis machen, erhalten wir keine konstanten Teilverhältnisse. Mit einer Ellipse kann es daher auch nicht funktionieren, das sich eine

Ellipse mit einer affinen Abbildung unter Erhaltung der Teilverhältnisse auf einen Kreis abbilden lässt. Auch mit der Hyperbel ist nichts zu wollen.

Die Parabel, der Exot unter den Kegelschnitten, ist also der interessante Fall.

## 10 Zirkel und Lineal

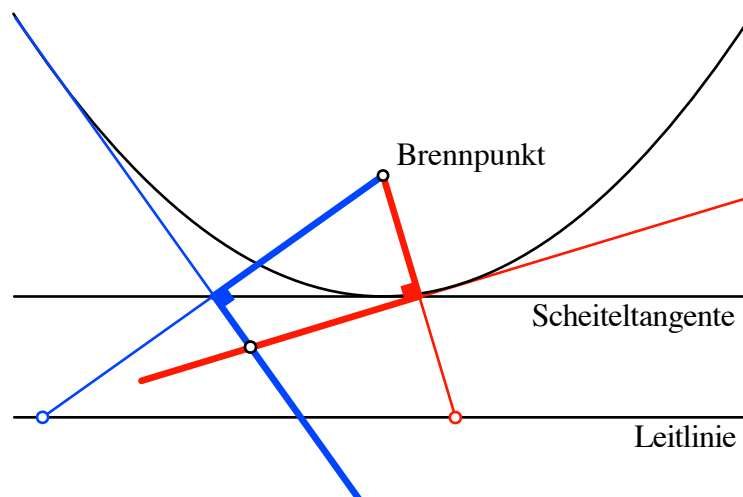
Die Kegelschnitte können punktweise mit Zirkel und Lineal konstruiert werden. Für die Parabel benötigen wir eine Gerade (Leitlinie) und einen Punkt (Brennpunkt). Die Abbildung 13 illustriert exemplarisch die Konstruktionen von zwei Punkten. Die jeweils gleichfarbigen Abstände sind gleich groß. Die Tangenten ergeben sich als Mittelsenkrechte.



**Abb. 13: Tangenten als Mittelsenkrechte**

In unserem Beispiel aus der Faltgeometrie (Abb. 2) spielen der Punkt die Rolle des Brennpunktes und die untere Papierkante die Rolle der Leitlinie.

Die rechten Winkel in der Abbildung 13 liegen auf der Scheiteltangente der Parabel (Abb. 14). Dabei erkennen wir auch wieder die Winkeleisen der Abbildung 4.



**Abb. 14: Scheiteltangente und Winkeleisen**

Damit schließt sich der Gedankenkreis.

Last modified: 23. August 2015