

## Graphen 3

### Wege, Zusammenhang, Rundtouren

- Definition

Es sei  $G = (V, E)$  ein schlichter Graph.

Eine Folge von Ecken  $v_0, v_1, \dots, v_k$  heißt ein **Kantenzug (Weg)**, wenn  $v_{i-1}$  und  $v_i$  für alle  $i = 1, \dots, k$  durch eine Kante verbunden sind, wenn also  $\{v_{i-1}, v_i\} \in E$  für  $i = 1, \dots, k$  gilt.

Ist  $v_0 \neq v_k$  heißt der Kantenzug **offen**, ist  $v_0 = v_k$  heißt er **geschlossen**. Die Anzahl  $k$  der durchlaufenen Kanten heißt die **Länge** des Kantenzugs.

- Anmerkung: Entsprechend bei anderen Arten von Graphen, z.B. gerichteten Graphen.

- Beispiel

- Anmerkung: Die Schreibweise  $v_0, v_1, \dots, v_k$  für einen Kantenzug ist im Grunde genommen eine Abkürzung für

$$\{v_0, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_{k-1}, v_k\}.$$

- Definition

Ein Kantenzug, bei dem keine Ecke mehrfach durchlaufen wird, heißt ein **einfacher Weg**.

Ein Kantenzug  $v_0, v_1, \dots, v_k$  mit  $v_0 = v_k$ , bei dem keine anderen Ecken (oder Kanten) mehrfach durchlaufen werden, heißt ein **Kreis** (geschlossener einfacher Weg, Zyklus).

- Beispiel

- Definition

Zwei Ecken eines Graphen heißen **zusammenhängend**, wenn sie durch einen Kantenzug verbunden sind.

- Anmerkung: Es wird in der Definition nicht gefordert, daß die Ecken durch einen einfachen Weg verbunden sind. Man kann aber zeigen:

- Satz

Sind zwei Ecken eines Graphen zusammenhängend, dann gibt es einen einfachen Weg, der sie verbindet.

- Beweis

- Definition

Ein Graph  $G$  heißt **zusammenhängend**, wenn zwei beliebig herausgegriffene Ecken stets zusammenhängend sind.

Ein Teilgraph heißt **(Zusammenhangs-)Komponente** von  $G$ , wenn

1. jede Ecke des Teilgraphen mit allen anderen Ecken des Teilgraphen zusammenhängt, und
2. keine Ecke außerhalb des Teilgraphen existiert, die mit einer Ecke innerhalb des Teilgraphen zusammenhängt.

Die Anzahl der Komponenten eines schlichten Graphen  $G$  bezeichnen wir durch  $\gamma(G)$ .

- Anmerkung: Eine Komponente ist also ein maximaler zusammenhängender Teilgraph.

- Beispiele

- Anmerkung: Stellen wir uns einen Graphen mit vielen Ecken und wenig Kanten vor. Anschaulich ist klar, daß er in viele Einzelteile zerfällt, daß also die Anzahl der Komponenten groß ist.

Das Zusammenspiel zwischen der Anzahl an Ecken, Kanten und Komponenten beschreiben wir mit den folgenden Sätzen.

- Satz

Es sei  $G$  ein schlichter Graph, und  $G'$  entstehe aus  $G$  durch das Hinzufügen einer einzelnen Kante zwischen zwei nicht benachbarten Ecken von  $G$ . Dann ist

$$\gamma(G') \geq \gamma(G) - 1,$$

d.h. durch das Hinzufügen einer Kante wird die Anzahl der Komponenten um höchstens 1 reduziert.

- Beweis (anschaulich).

- Satz

Für jeden schlichten Graphen  $G = (V, E)$  gilt

$$\gamma(G) \geq |V| - |E|.$$

- Beispiele
- Beweis
- Satz

Ist ein schlichter Graph  $G = (V, E)$  zusammenhängend, dann gilt

$$|E| \geq |V| - 1.$$

- Beweis
- Anmerkung: Wenn ein zusammenhängender Graph nach dem Entfernen einer beliebigen Kante zusammenhängend bleibt, nennt man ihn **mehrfach zusammenhängend**.

Diese Eigenschaft ist in der Praxis oft sehr wichtig.

- Beispiele: Stromnetze, Kommunikationsnetze.
- Beispiel: Das Königsberger Brückenproblem.

Wir machen einen Spaziergang durch Königsberg anno 1736 und fragen uns: Kann man alle Brücken überqueren<sup>1</sup>, jede genau einmal, und zum Ausgangspunkt zurückkehren?

- Skizze
- Problemstellung mit Multigraph und mit schlichtem Graphen.
- Definition

Ein Graph  $G$  heißt **Euler-Graph**, wenn es einen geschlossenen Kantenzug gibt, der jede Kante von  $G$  genau einmal durchläuft.

Der Kantenzug heißt dann **Euler-Kantenzug**.

- Anmerkung: Bei dem Königsberger Brückenproblem wird also gefragt, ob es einen Euler-Kantenzug gibt.
- Satz
- Beweis
- Anmerkung: Es gibt somit keine Euler-Rundtour durch Königsberg.

Ist  $G$  ein eulerscher Graph, dann hat jede Ecke von  $G$  geraden Grad.

---

<sup>1</sup>Über sieben Brücken musst du gehn.

- Satz

Ist der Graph  $G$  zusammenhängend und jeder Eckengrad gerade, dann gibt es einen Euler-Kantenzug.

- Beweis

- Anmerkung: Bei einem Euler-Kantenzug soll jede Kante genau einmal durchlaufen werden. Wir wandeln diese Bedingung nur leicht ab und bekommen eine Problemstellung, die erstaunlicherweise wesentlich schwieriger ist, wie sich bei der Untersuchung von Lösungsalgorithmen herausgestellt hat. (Die genaue Begründung geht allerdings weit über unsere Vorlesung hinaus.)

Wir fragen: Gibt es einen Kantenzug im Graphen  $G$ , der *jede Ecke* von  $G$  *genau einmal* durchläuft und dann zur Ausgangsecke zurückkehrt? Kurz: Gibt es einen Kreis in  $G$ , der jede Ecke von  $G$  enthält?

- Definition

Ein Kreis im Graphen  $G$ , der jede Ecke von  $G$  enthält, heißt ***Hamilton-Kreis***.

- Anmerkung: Eine einfache Charakterisierung derjenigen Graphen, bei denen es einen Hamilton-Kreis gibt, ist nicht bekannt.

Für spezielle Graphen gilt:

- Satz

Jeder Graph mit  $n$  Ecken,  $n \geq 3$ , dessen kleinster Eckengrad mindestens  $n/2$  ist, besitzt einen Hamilton-Kreis.

- Anmerkung: Ein Hamilton-Kreis enthält alle Ecken eines Graphen und ist in diesem Sinne größtmöglich. Einen anderen Extremfall haben wir, wenn ein Graph überhaupt keinen Kreis enthält.

Wir werden zusammenhängende Graphen, die keine Kreise enthalten, als ***Bäume*** bezeichnen. Wegen der großen Bedeutung von Bäumen werden wir uns detaillierter mit ihnen beschäftigen.