Zusammenfassung Markovketten

Tim Baumann, http://timbaumann.info/uni-spicker

Endliche Markovketten

Setting. Sei $E \neq \emptyset$ eine höchstens abzählbare Menge, die *Zustandsmenge*. Eine **stochastische Matrix** Π auf E ist geg. durch eine Abbildung $p : E \times E \to [0,1]$ mit

$$\textstyle\sum_{y \in E} p(x,y) = 1 \quad \forall\, x \in E.$$

Def. Für einen *Vektor* $\pi : E \to \mathbb{R}$ ist $\pi\Pi : E \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$(\pi\Pi)(x) \coloneqq \textstyle\sum_{z \in E} \pi(z) \cdot p(z,x).$$

(Annahme dabei: $\sum_{z \in E} |\pi(z)| \cdot p(z,x) < \infty$ für alle $x \in E$.)

Def. Eine Folge von ZVen $\{X_n \in E\}$ heißt **Markovkette** *auf* E mit *Übergangsmatrix* p, falls für alle $n \geq 1$ und $x_0, \ldots, x_{n+1} \in E$ gilt:

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}(X_{n+1} = x_{n+1} \,|\, X_0 = x_0, \ldots, X_n = x_n) \\ = \quad & \mathbb{P}(X_{n+1} = x_{n+1} \,|\, X_n = x_n) = p(x_{n+1}, x_n) \end{aligned}$$

Interpretation. Bei gegebener Gegenwart $X_n = x_n$ ist die Zukunft X_{n+1} unabhängig von der Vergangenheit.

Bem. Die Verteilung der ganzen Folge $\{X_n\}$ ist durch die Verteilung von X_0 (*Startverteilung*) und durch p eindeutig bestimmt:

$$\mathbb{P}(X_0 = x_0, \ldots, X_n = x_n) = \mathbb{P}(X_0 = x_0) \cdot \textstyle\prod_{k=1}^{n} p(x_{n-1}, x_n)$$

Gibt $\pi_0 : E \to [0,1]$ die Startverteilung an, und π_n die Verteilung nach dem n-ten Schritt für $n \geq 1$, so gilt:

$$\pi_n = \Pi^n \pi_0$$

Def. Für $n \in \mathbb{N}$ und $x, y \in E$ ist

$$p^{(n)}(x,y) \coloneqq \mathbb{P}(X_n = y \,|\, X_0 = x)$$

die **n-Schritt-Übergangswahrscheinlichkeit** von x nach y.

Lem (**Kolmogorov-Chapman-Gleichung**). Für $\ell, k \in \mathbb{N}$, $x, y \in E$ gilt

$$p^{(k+\ell)}(x,y) = \textstyle\sum_{z \in E} p^{(k)}(x,z) p^{(\ell)}(z,y).$$

Bem. Bekannte Spezialfälle:

$$\begin{aligned} \textit{Vorwärtsgleichung:} \quad & p^{(k+1)}(x,y) = \textstyle\sum_{z \in E} p^{(k)}(x,z) p(z,y) \\ \textit{Rückwärtsgleichung:} \quad & p^{(k+1)}(x,y) = \textstyle\sum_{z \in E} p(x,z) p^{(k)}(z,y) \end{aligned}$$

Def. Eine Verteilung π heißt **stationär**, falls $\pi = \pi\Pi$.

Satz. Sei $\{X_n\}$ eine Markovkette auf einem endlichen Zustandsraum E mit der Übergangsmatrix Π. Dann sind äquivalent:

- Es gibt ein $n_0 \geq 1$ mit $\forall\, x, y \in E : p^{(n_0)}(x,y) > 0$.
- Es existiert ein $\pi : E \to (0,1]$ mit

$$p^{(n)}(x,y) \xrightarrow{n \to \infty} \pi(y) \quad \forall\, x, y \in E.$$

In diesem Fall ist π die einzige stationäre Verteilung. Die Konvergenz ist exponentiell schnell:

$$|p^{(n)}(x,y) - \pi(y)| \leq C e^{-an} \quad \text{für Konstanten } C, a > 0.$$

Desweiteren gilt unabhängig von der Startverteilung

$$\mathbb{P}(X_n = y) \xrightarrow{n \to \infty} \pi(y) \quad \forall\, y \in E.$$

Achtung. Stationäre Verteil. können ohne Konvergenz existieren!

Satz. Falls $\forall\, x, y \in E : p^{(n_0)}(x,y) > 0$ für ein $n_0 \in \mathbb{N}$, so gilt

$$\tfrac{1}{n+1} \cdot \textstyle\sum_{k=0}^{n} \mathbb{1}\{X_k = x\} \xrightarrow[n \to \infty]{\mathbb{P}} \pi(x) \quad \forall\, x \in E.$$

Bem. Eine Übergangsmatrix heißt **doppelt stochastisch**, falls

$$\textstyle\sum_{y \in E} p(x,y) = 1 \;\; \forall\, y \in E \quad \text{und} \quad \sum_{x \in E} p(x,y) = 1 \;\; \forall\, x \in E.$$

Für jede solche Übergangsmatrix auf einem endlichen Raum ist die uniforme Verteilung stationär.

Bem (**Paradox von Parrondo**). Es gibt zwei Glücksspiele, bei denen man fast-sicher irgendwann all sein Geld verliert, dies aber nicht der Fall ist, falls man sie abwechselnd spielt! Diese Glücksspiele kann man als Markovketten modellieren, wobei der aktuelle Zustand durch die Anzahl an Euros im Besitz des Spielers gegeben ist.

Abzählbare Markovketten

Notation. Sei im Folgenden $\{Z_n\}$ eine Markovkette auf einem abzählbaren Zustandsraum E.

Def. Für $x \in E$ und $n \in \mathbb{N}$ definiere die ZV $\tau_x^{(n)}$ induktiv durch

$$\begin{aligned} \tau_x^{(1)} &\coloneqq \inf\{n > 0 \,|\, Z_n = x\} \in \mathbb{N} \cup \{\infty\} \\ \tau_x^{(k)} &\coloneqq \inf\{n > \tau_x^{(k-1)} \,|\, Z_n = x\}, \quad k > 1. \end{aligned}$$

(Beachte: $\tau_x^{(k)}$ ist eine messbare Abbildung.)

Bem. Ferner gilt $\{\tau_x^{(k)} = n\} \in \sigma(Z_0, Z_1, \ldots, Z_n)$.

Def. Für $x, y \in E$ sei $F(x,y) \coloneqq P(\tau_y^{(1)} < \infty \mid Z_0 = x)$

Lem. Für alle $x, y \in E$ und $k \geq 1$ gilt

$$P(\tau_y^{(k)} < \infty \mid Z_0 = x) = F(x,y) \cdot F(y,y)^{k-1}.$$

Bem. Setze $\widetilde{\ell}(y) \coloneqq \sum_{k=j}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\}$. Dann gilt

$$P(\tau_y^{(k)} < \infty \mid Z_0 = x) = P(\widetilde{\ell} \geq k \mid Z_0 = x).$$

Def. Ein Zustand $x \in E$ heißt

- **absorbierend**, falls $p(x,x) = 1$,
- **rekurrent**, falls $F(x,x) = 1$ und
- **transient**, falls $F(x,x) < 1$.

Bem. Absorbierende Zustände sind rekurrent.

Bsp. In der Markovkette

$$\begin{tikzcd} (0) \arrow[r, bend left, "1"] & (1) \arrow[l, bend left, "1-p"] \arrow[r, bend left, "p"] & (2) \arrow[l, bend left, "1-p"] \arrow[r, bend left, "p"] & (3) \arrow[l, bend left, "1-p"] \arrow[r, bend left, "p"] & \ldots \arrow[l, bend left, "1-p"] \end{tikzcd}$$

ist (0) genau dann rekurrent, falls $p \leq 1/2$, ansonsten transient. TODO: genauer!

Def. Die **Anzahl der Besuche** in $y \in E$ ist

$$\ell(y) \coloneqq \textstyle\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\}.$$

Die **Green'sche Funktion** von $\{Z_n\}$ ist $G : E \times E \to [0, \infty]$ mit

$$G(x,y) \coloneqq \mathbb{E}(\ell(y) \mid Z_0 = x).$$

Bem.
$$\begin{aligned} G(x,y) &= \mathbb{E}(\textstyle\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{1}\{Z_k = y\} \mid Z_0 = x) \\ &= \textstyle\sum_{k=0}^{\infty} P(Z_k = y \mid Z_0 = x) \\ &= \delta_{xy} + \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} p^{(k)}(x,y). \end{aligned}$$

Satz. Für alle $x, y \in E$ gilt

$$G(x,y) = \begin{cases} F(x,y)/(1 - F(y,y)) & \text{falls } x \neq y, \\ 1/(1 - F(y,y)) & \text{falls } x = y. \end{cases}$$

Kor. x ist rekurrent $\iff G(x,x) = \infty$

Lem. Ist $F(x,y) \in (0,1)$, so ist x nicht rekurrent.

Satz. Ist $x \in E$ rekurrent und $F(x,y) > 0$, so ist y auch rekurrent und $F(x,y) = F(y,x) = 1$.

Satz. Es sind äquivalent:

- x ist rekurrent
- $F(x,x) = 1$
- $G(x,x) = \infty$
- $\forall\, y \in E : F(x,y) \in \{0,1\}$
- $\forall\, y \in E : G(x,y) \in \{0,\infty\}$

Bem. $F(x,y) > 0 \iff \exists\, n \geq 1 : p^{(n)}(x,y) > 0$

Def. $\{Z_n\}$ heißt **irreduzibel**, falls $\forall\, x, y \in E : F(x,y) > 0$.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ irreduzibel. Dann sind entweder alle Zustände rekurrent oder alle Zustände transient.

Satz. Irreduzible Ketten auf endlichen Räumen sind rekurrent.

Rekurrenz und Transienz von Irrfahrten

Situation. $\{Z_n\}$ ist eine Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^d$, d. h.

$$p(x,y) = p(0,y-x) =: q(y-x).$$

Mit and. Worten: Die *Zuwächse* $\{Z_n - Z_{n-1}\}_{n\geq 1}$ sind i. i. d. ZVn.

Bsp. Einfache Irrfahrt auf $\mathbb{Z}$: $\quad p(0,1)=p,\ p(0,-1)=q=1-p$

In diesem Fall kann man die Greensche Funktion exakt berechnen:

$$\begin{aligned}
G(x,x) &= G(0,0) \\
&= \textstyle\sum_{m=0}^{\infty} p^{(m)}(0,0) \\
&= 1+\textstyle\sum_{n=1}^{\infty} p^{(2n)}(0,0) \\
&= 1+\textstyle\sum_{n=1}^{\infty} \binom{2n}{n} p^n(1-p)^n \\
&= 1+\textstyle\sum_{n=1}^{\infty} \binom{2n}{n} 4^{-n}(4p(1-p))^n \\
&= (1-4p(1-p))^{-1/2} \\
&= 1/|2p-1|
\end{aligned}$$

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine Irrfahrt auf $\mathbb{Z}$ mit

$$\mathbb{E}|Z_1 - Z_0| = \textstyle\sum_{x\in\mathbb{Z}} |x| p(0,x) < \infty.$$

Dann gilt: $\quad \{Z_n\}$ ist rekurrent $\iff \sum_{x\in\mathbb{Z}} x p(0,x) = 0.$

Def. Die **einfache symmetrische Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^d$** ist die translationsinvariante Markovkette mit

$$p(0,\pm e_i) = \tfrac{1}{2d} \quad \text{für } i=1,\dots,d.$$

Bem. Für einfache symmetrische Irrfahrten gilt:

$$p^{(2n)}(x,x) = \sum_{\substack{k_1,\dots,k_d\in\mathbb{N}\\ k_1+\dots+k_d=n}} \frac{(2n)!}{(k_1!)^2\cdots(k_d!)^2}\left(\frac{1}{2d}\right)^{2n}$$

Für $d=2$ gilt $p^{(2n)}(0,0) = [\binom{2n}{n}(\frac{1}{2})^{2n}]^2$. Mit der Stirling'schen Formel folgt $p^{(2n)}(0,0) \approx \frac{1}{\pi n}$. Somit gilt $\sum p^{(2n)}(0,0) = \infty$.

Fazit. Die zweidimensionale einfache symm. Irrfahrt ist rekurrent.

Bem. Man kann zeigen: Für einfache symm. Irrfahrten auf $\mathbb{Z}^d$ gilt

$$p^{(2n)}(0,0) \leq C_d/n^{d/2}$$

für eine Konstante $C_d > 0$. Somit ist die einfache Irrfahrt transient für alle $d \geq 3$.

Def. $\varphi(t) := \sum_{x\in\mathbb{Z}^d} e^{i(t\cdot x)} p(0,x) \quad$ für $t\in\mathbb{R}^d$

Bem. Da die Zuwächse $\{Z_n - Z_{n-1}\}$ i. i. d. sind, gilt

$$\textstyle\sum_{x\in\mathbb{Z}^d} e^{i(t\cdot x)} p^{(n)}(0,x) = \varphi^n(t), \quad n\geq 1$$

Inversionsformel: $\quad p^{(n)}(0,x) = \frac{1}{(2\pi)^d} \int\limits_{[-\pi,\pi)^d} e^{-i(t\cdot x)}\varphi^n(t)\,\mathrm{d}t$

Satz. Für jede Irrfahrt $\{Z_n\}$ auf $\mathbb{Z}^d$ gilt

$$G(0,0) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^d \lim_{\lambda\uparrow 1} \int\limits_{t\in[-\pi,\pi)^d} Re\left(\tfrac{1}{1-\lambda\varphi(t)}\right)\mathrm{d}t = \infty$$

Bsp. Für die einfache symm. Irrfahrt $\{Z_n\}$ auf $\mathbb{Z}^d$ ist

$$\varphi(t) = \tfrac{1}{d}\textstyle\sum_{k=1}^{d}\cos(t_k)$$

Mit der Ungleichung $1-\cos(u) \geq c_0 u^2$ für alle $u\in[-\pi,\pi]$ folgt

$$\varphi(t) \geq \tfrac{c_0}{d}|t|^2.$$

Es folgt

$$\tfrac{1}{1-\lambda\varphi(t)} \leq \tfrac{d}{\lambda c_0}|t|^{-2}$$

Die Funktion $|t|^{-2}$ ist auf $[-\pi,\pi)^d$ für jedes $d\geq 3$ integrierbar. Somit ist die einfache Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^d$, $d\geq 3$, transient.

Satz. Jede irreduzible Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^d$ mit $d\geq 3$ ist transient.

Bsp. Sei $\{Z_n\}$ eine Irrfahrt auf $\mathbb{Z}$ mit $p(0,x)=p(0,-x)$. Gelte

$$x^\alpha p(0,x) \xrightarrow{x\to\infty} c\in(0,\infty)$$

für ein $\alpha > 1$. Dann ist

$$1-\varphi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty}(1-\cos(nt))p(0,n) \quad\text{und}\quad \frac{1-\varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty}|n|^\alpha p(0,n)|t|f(nt)$$

mit $f(x) = (1-\cos(x))/|x|^\alpha$. Außerdem $|n|^\alpha p(0,n) = c+\epsilon_n$, wobei $\epsilon_n\to 0$ für $|n|\to\infty$. Es folgt

$$\tfrac{1-\varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c|t|f(nt) + \sum_{n=-\infty}^{\infty}\epsilon_n|t|f(nt).$$

Für $t\to 0$ hat man

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty}|t|f(nt) \to \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\,\mathrm{d}x \quad\text{und}\quad \sum_{n=-\infty}^{\infty}\epsilon_n|t|f(nt)\to 0.$$

Es folgt für $\alpha < 3$:

$$\lim_{t\to 0}\tfrac{1-\varphi(t)}{|t|^{\alpha-1}} = c\int_{-\infty}^{\infty}\tfrac{1-\cos(x)}{|x|^\alpha}\,\mathrm{d}x < \infty$$

Folglich ist $\frac{1}{1-\varphi(t)}$ für $\alpha < 2$ integrierbar und somit $\{Z_n\}$ transient.
Für $\alpha = 2$ ist $1/(1-\varphi(t))$ in der Umgebung von null nicht integrierbar und damit $\{Z_n\}$ rekurrent.
Für $\alpha > 2$ ist $\sum|x|p(0,x) < \infty$ und somit ist die Irrfahrt rekurrent, da der Erwartungswert der Zuwächse null ist.

Erneuerungstheorie

Situation. Seien $\{X_k\}_{k\geq 1}$ unabhängige ZVn mit Werten in $\mathbb{N}$ und $P(X_k\geq 1) > 0$, wobei $\{X_k\}_{k\geq 2}$ identisch vert. sind. Dann definiert

$$Z_n := \textstyle\sum_{k=1}^{n} X_k + Z_0$$

eine Irrfahrt $\{Z_n\}_{n\geq 0}$ mit nicht-negativen Zuwächsen auf $\mathbb{Z}$.

Ziel. Untersuche das asympt. Verhalten von $G(0,x)$.

Def. Die **erzeugende Funktion** einer Folge $\{a_n\}$ ist

$$A(s) := \textstyle\sum_{n=0}^{\infty} a_n s^n.$$

Bsp. Setze $p_k := P(X_2 = k)$, $k\geq 0$. Wir nehmen an, dass

$$a := \mathbb{E}[X_2] = \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} k p_k \in (0,\infty).$$

Definiere $q_k := \frac{1}{a}\sum_{j=k}^{\infty} p_j$ für $k\geq 1$. Dann ist $\sum_{k=1}^{\infty} q_k = 1$.
Sei X_1 eine ZV mit $P(X_1 = k) = q_k$, $k\geq 1$. Setze

$$\begin{aligned}
f(s) &:= \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} p_k s^k = \mathbb{E}[s^{X_2}], \quad |s|\leq 1 \\
g(s) &:= \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} q_k s^k = \mathbb{E}[s^{X_1}] \\
\psi(s) &:= \textstyle\sum_{x=1}^{\infty} G(0,x)s^x, \quad |s| < 1
\end{aligned}$$

Dann gilt für $|s| < 1$:

$$\psi(s) = \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} g(s)f(s)^{k-1} = g(s)/(1-f(s))$$

Außerdem gilt:

$$g(s) = \tfrac{s}{a(1-s)}(1-f(s))$$

Es folgt:

$$\psi(s) = \sum_{x=1}^{\infty}\tfrac{1}{a}s^x$$

Somit ist $G(0,x) = \frac{1}{a}$.

Satz. Angenommen, ggT$\{k\,|\,p_k > 0\} = 1$. Dann gilt für jede Verteilung von X_1, dass

$$G(0,x) \xrightarrow{x\to\infty} \tfrac{1}{a}.$$

Lem. Sei $g(\theta)$ integrierbar auf $[-\pi,\pi)$. Dann gilt

$$\int\limits_{[-\pi,\pi)} e^{i\theta x}g(\theta)\,\mathrm{d}\theta \xrightarrow{|x|\to\infty} \quad (x\in\mathbb{Z})$$

Lem. Seien alle X_k identisch verteilt und ggT$\{p\,|\,p_k > 0\} = 1$. Dann existiert $L := \lim_{x\to\infty} G(0,x)$.

Def. Seien $\{X_k\}_{k\geq 1}$ unabhängige, nichtneg. ZVn und seien $\{X_k\}_{k\geq 2}$ identisch verteilt. Setze $Z_n := \sum_{k=1}^{n} X_k$. Dann heißt

$$\begin{aligned}
\eta(t) &:= \min\{k\geq 1\,|\,Z_k > t\} && \textbf{Erneuerungsprozess} \text{ und} \\
H(t) &:= \mathbb{E}[\eta(t)] && \textbf{Erneuerungsfunktion}.
\end{aligned}$$

Falls X_k nur Werte aus $\mathbb{N}$ annimmt, so können wir das Verhalten von $H(t) - H(t-1)$ wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} H(t) &= \mathbb{E}[\eta(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} P(\eta(t) > k) = \sum_{k=0}^{\infty} P(Z_k \le t) \\ \rightsquigarrow \quad H(t) - H(t-1) &= \sum_{k=0}^{\infty} P(Z_k = t) \xrightarrow{t\to\infty} 1/\mathbb{E}[X_2]. \end{aligned}$$

Def. $\gamma(t) \quad := \quad t - Z_{\eta(t)-1} \ge 0$ heißt **Undershoot**,
$\chi(t) \quad := \quad Z_{\eta(t)} - t > 0$ heißt **Overshoot**.

Satz. Sind die Bedingungen des letzten Satzes erfüllt, so gilt

$$P(\gamma(t) = i, \chi(t) = j) \xrightarrow{t\to\infty} \frac{p_{i+j}}{\mathbb{E}[X_2]} \qquad \text{für alle } i \ge 0, j \ge 1.$$

Kor. $P(\gamma(t) = i) \quad \xrightarrow{t\to\infty} \quad \frac{1}{a}\sum_{k=i+1}^{\infty} p_k,$
$P(\gamma(t) = j) \quad \xrightarrow{t\to\infty} \quad \frac{1}{a}\sum_{k=j}^{\infty} p_k$

TODO: Eine der Gleichungen im Korollar sollte χ beinhalten.

Positive Rekurrenz

Def. $x \in E$ heißt **positiv rekurrent**, falls $\mathbb{E}[\tau_x^{(1)} | Z_0 = x] < \infty$.
Ist x rekurrent, aber nicht pos. rekurrent, so heißt x **nullrekurrent**.

Bem. positive Rekurrenz $\implies$ Rekurrenz

Lem. Sei x ein positiv rekurrenter Zustand.
Ist $F(x, y) > 0$, so ist auch y positiv rekurrent.

Kor. Ist $\{Z_n\}$ irreduzibel und $x_0 \in E$ positiv rekurrent, so gilt:

- alle Zustände sind positiv rekurrent
- $m(x, y) := \mathbb{E}[\tau_y^{(1)} | Z_0 = x] < \infty$ für alle $x, y \in E$

Def. Die Zahl $d_x := \mathrm{ggT}\{n \ge 1 \,|\, p^{(n)}(x, x) > 0\}$ heißt **Periode** von x. Falls $d = d_x$ für alle $x \in E$, so heißt d *Periode* der Kette $\{Z_n\}$.

Lem. Ist $\{Z_n\}$ irreduzibel, so gilt $d_x = d_y$ für alle $x, y \in E$.

Satz. Es gibt eine Familie $\{\pi_y \in \mathbb{R}_{>0}\}_{y\in E}$, sodass

$$\forall\, x, y \in E \;:\; p^{(n)}(x, y) \xrightarrow{n\to\infty} \pi_y$$

genau dann, wenn

- $\{Z_n\}$ irreduzibel und
- aperiodisch (d. h. $d = 1$) ist und
- ein x_0 existiert, sodass $m(x_0, x_0) < \infty$.

Die Folge $\{\pi_y\}_{y\in E}$ ist die eindeutige Lösung zu

$$\begin{cases} \sum_{y\in E} |P_y| < \infty \\ \sum_{y\in E} \pi_y = 1 \\ \sum_{x\in E} \pi_x p(x, y) = \pi_y \text{ für alle } y \in E \end{cases}$$

Es gilt $\pi_y = 1/m(y, y)$.

Def. Eine Verteilung $\{\mu_x\}_{x\in E}$ auf E heißt **stationär**, falls

$$\mu_x = \sum_{y\in E} \mu_y p(y, x) \quad \text{für alle } x \in E \qquad (\text{kurz: } \mu = \mu P).$$

Bem. Für eine stationäre Verteilung $\{\mu_x\}_{x\in E}$ gilt

$$\mu_x = \sum_{y\in E} \mu_y p^{(n)}(y, x) \quad \text{für alle } x \in E \text{ und } n \in \mathbb{N}$$

Lem. Sei x ein positiv rekurrenter Zustand. Dann definiert

$$\mu_y^{(x)} := \frac{1}{m(x, x)} \cdot \mathbb{E}\left[\sum_{k=0}^{\tau_x^{(1)}-1} \mathbb{1}\{Z_k = y\} \middle| Z_0 = x\right]$$

für alle $y \in E$ eine stationäre Verteilung $\{\mu_y^{(x)}\}_{y\in E}$.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible Kette. Dann gilt:
$\{Z_n\}$ ist pos. rekurrent $\iff$ $\{Z_n\}$ hat eine stationäre Verteilung.
In diesem Fall ist die stationäre Verteilung eindeutig.

Satz. Eine irreduzible Kette auf einem endlichen Zustandsraum ist immer positiv rekurrent. Ferner existieren $C > 0$ und $q \in (0, 1)$ mit

$$P(\tau_y^{(1)} > n \,|\, Z_0 = x) < Cq^n \quad \text{für alle } n \ge 1 \text{ und } x, y \in E.$$

Satz. Sei $\{Z_n\}$ irreduzibel und positiv rekurrent.
Sei $f : E \to \mathbb{R}$ integrierbar bezüglich der stationären Verteilung $\{\pi_x\}$, d. h. $\sum_{x\in E} |f(x)| \pi_x < \infty$. Dann gilt

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} f(Z_k) \xrightarrow{\text{f. s.}} \sum_{x\in E} f(x) \pi_x$$

Bsp. Für $f(y) := \mathbb{1}\{y = x_0\}$ für eine $x_0 \in E$ erhalten wir

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \mathbb{1}\{Z_k = x_0\} \xrightarrow{\text{f. s.}} \pi_{x_0}.$$

Es folgt mit majorisierter Konvergenz:

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} p^{(k)}(x, x_0) \xrightarrow{n\to\infty} \pi_{x_0}.$$

Bsp. Sei $\{Z_n\}$ irreduzibel, periodisch mit Periode $p > 1$. Dann gilt

$$p^{(dk)}(x_0, x_0) \xrightarrow{d} /m(x_0, x_0).$$

Lem. Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible Kette mit der Periode $d \ge 1$.
Für jedes $x \in E$ existiert ein $m_x \ge 1$ mit

$$p^{(md)}(x, x) > 0 \text{für alle } m \ge m_x.$$

Prop. Sei $\{Z_n\}$ irreduzibel und periodisch mit $d \ge 1$.
Dann existieren paarweise disjunkte $C_0, C_1, \dots, C_{d-1} \subseteq E$ mit $C_0 \cup \ldots \cup C_{d-1} = E$ und

$$\{y \in E \,|\, x \in C_i, p(x, y) > 0\} = C_{(i+1)\%d}.$$

In anderen Worten: Die Mengen C_i werden zyklisch besucht.

Bem. Die Markovkette $\{Z_{md}\}_{m\ge 0}$ ist nicht irreduzibel (für $d > 1$) aber die Restriktion auf jedes C_i ist irreduzibel und außerdem aperiodisch. Mit dem Ergodensatz erhalten wir

$$p^{(md)}(x, y) \xrightarrow{m\to\infty} d/m(y, y) \quad \text{für alle } x, y \in C_i$$

Falls $x \in C_0$ und wir wollen $p^{(md+r)}(x, y)$ berechnen, so reicht es $y \in C_r$ zu betrachten. Definiere

$$F_r(x, y) := \mathbb{P}(\tau_y^{(1)} < \infty,\, \tau_y^{(1)} \equiv r \,(\mathrm{mod}\, d) \,|\, Z_0 = x)$$

Es gilt dann:

$$p^{(md+r)}(x, y) \xrightarrow{m\to\infty} F_r(x, y) d/m(y, y)$$

Martingale

Sei im Folgenden $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ ein Maßraum.

Def. Eine wachsende Folge $\mathcal{F}_0 \subseteq \mathcal{F}_1 \subseteq \ldots$ von σ-Algebren heißt **Filtration**. Eine Folge von ZVen $\{M_n\}$ heißt **adaptiert** an die Filtration $\{\mathcal{F}_n\}$, falls M_n $\mathcal{F}_n$-messbar ist für jedes $n \geq 0$.

Def. Sei X eine ZV mit $\mathbb{E}[|X|] < \infty$. Dann heißt $\widehat{X}$ **bedingte Erwartung** von X bzgl. σ-Algebra $\mathcal{A}$ falls $\hat{X}$ $\mathcal{A}$-messbar ist und $\mathbb{E}[X\mathbb{1}_A] = \mathbb{E}[\hat{X}\mathbb{1}_A]$ für alle $A \in \mathcal{A}$.

Def. Eine $\{F_n\}$-adapt. Folge $\{M_n\}$ mit $\forall\, n : \mathbb{E}[|M_n|] < \infty$ heißt

$$\left.\begin{array}{l}\textbf{Martingal}\\ \textit{Submartingal}\\ \textit{Supermartingal}\end{array}\right\} \text{ falls } \mathbb{E}[M_{n+1}|\mathcal{F}_n] \left\{\begin{array}{c} = \\ \geq \\ \leq \end{array}\right\} M_n \quad \forall\, n \geq 0.$$

Bem. • $\{M_n\}$ ist Submartingal $\iff$ $\{-M_n\}$ ist Supermartingal
- $\{M_n\}$ ist Martingal $\iff$ $\{M_n\}$ ist Super- und Submartingal

Bem. Martingal-Strategie für wdh. Werfen einer fairen Münze:
- 1. Runde: Einsatz = 1 Euro, bei Gewinn Ausstieg
- 2. Runde: Einsatz = 2 Euro, bei Gewinn Ausstieg, ...
- n. Runde: Einsatz = 2^{n-1} Euro, bei Gewinn Ausstieg

Es gilt: $T = \inf\{n \geq 1 \,|\, n\text{-te Runde ist gewonnen}\} < \infty$ fast sicher, der Gewinn ist 1 Euro.

Bsp. Seien $\{X_i\}$ unabh. ZVen mit $\mathbb{E}[X_i] = 0$ for alle $i \geq 0$. Sei $M_n := X_1 + \ldots + X_n$. Dann ist $\{M_n\}$ ein Martingal bzgl. der Filtration $\{\mathcal{F}_n\}$ mit $\mathcal{F}_n := \sigma(X_1, \ldots, X_n)$.

Def. Für eine Folge $\{M_n\}$ von ZVen heißt $\{\sigma(M_0, M_1, \ldots, M_n)\}_{n\geq 0}$ **natürliche Filtration**.

Lem. Ist $\{M_n\}$ ein Martingal bzgl. einer bel. Filtration, so ist $\{M_n\}$ auch ein Martingal bzgl. der natürlichen Filtration.

Def. $\{M_n\}$ ist Martingal $:\iff$ $\{M_n\}$ ist Martingal bzgl. der natürlichen Filtration

Lem. Ist $\{M_n\}$ ein Submartingal, so gilt $\mathbb{E}[M_{i+1}] \geq \mathbb{E}[M_i]$.

Lem. Sei $\{M_n\}$ ein Martingal bzgl. $\{\mathcal{F}_n\}$. Dann gilt:

$$\mathbb{E}[M_n|\mathcal{F}_i] = M_i \quad \text{für alle } i \leq n.$$

Lem. Sei $\{M_n\}$ ein Martingal bzgl. $\{\mathcal{F}_n\}$ und sei φ eine konvexe messbare Funktion. Falls $\mathbb{E}[|\varphi(M_n)|] < \infty$ für alle $n \geq 1$, so ist die Folge $\{\varphi(M_n)\}_{n\geq 0}$ ein Submartingal bzgl. $\{F_n\}$

Bem. Die Aussage des vorh. Lemmas gilt auch, falls $\{M_n\}$ nur ein Submartingal, dafür aber φ zusätzlich monoton wachsend ist.

Bsp. $\{M_n\}$ Martingal $\implies$ M_n^2, M_n^+, $|M_n|$ Submartingale

Bsp. Ein Anleger kauft H_0 Aktien einer Firma. Es sei W_0 der Wert der Aktien beim Kauf, Y_n der Kurs der Aktie n Tage nach dem Kauf und H_n die Anzahl der Aktien n Tage nach dem Kauf. Forderung: H_n soll $\sigma(Y_0, \ldots, Y_{n-1})$-messbar sein. Sei W_n der Wert der Aktien n Tage nach dem Kauf. Es gilt

$$W_n = W_{n-1} + H_n(Y_n - Y_{n-1}) = W_0 + \textstyle\sum_{i=1}^n H_i(Y_i - Y_{i-1})$$

Falls $\{Y_n\}$ ein Martingal ist, so gilt

$$\begin{array}{rl} & \mathbb{E}[W_{n+1}|\mathcal{F}_n] \\ = & \mathbb{E}[W_n + H_{n+1}(Y_{n+1} - Y_n)|\mathcal{F}_n] \\ = & W_n + \mathbb{E}[H_{n+1}(Y_{n+1} - Y_n)|\mathcal{F}_n] \\ = & W_n + H_{n+1}\mathbb{E}[Y_{n+1} - Y_n|\mathcal{F}_n] \\ = & W_n + H_{n+1}(\mathbb{E}[Y_{n+1}|\mathcal{F}_n] - Y_n) \\ = & W_n \ \text{(bzw. } \geq W_n \text{ für Sub- und } \leq W_n \text{ für Supermartingale).} \end{array}$$

Fazit: Mit Handelsstrategie kann man keine Anlage verbessern.

Def. Eine Folge $\{H_n\}_{n\geq 1}$ heißt **prävisibel**, falls H_n $\mathcal{F}_{n-1}$-messbar ist für alle $n \geq 1$. Definiere $\{H \cdot Y\}_n$ durch

$$(H \cdot Y)_n := \textstyle\sum_{i=1}^n H_i(Y_i - Y_{i-1})$$

Satz. Sei $\{Y_n\}$ ein Supermartingal und sei $\{H_n\}$ prävisibel jeweils bzgl. der Filtration $\{\mathcal{F}_n\}$. Falls $H_n \in [0, C_n]$ für Konstanten $\{C_n\}$, so ist $\{(H \cdot Y)_n\}$ auch ein Supermartingal.

Bem. Man kann den Satz für Submartingale und Martingale formulieren. Für Martingale reicht es anzunehmen, dass $|H_n| \leq C_n$.

Def. Eine Abb. $T : \Omega \to \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ heißt **Stoppzeit** bzgl. $\{F_n\}$, falls

$$\{T = n\} \in \mathcal{F}_n \quad \text{für alle } n \geq 0.$$

Bsp. Sei $\{M_n\}$ eine Folge von ZVen und sei $A \in \mathfrak{B}(\mathbb{R})$. Dann ist $T = \inf\{n \geq 0 \,|\, M_n \in A\}$ eine Stoppzeit bzgl. $\{\sigma(M_0, \ldots, M_n)\}_n$.

Satz (**Optional Stopping Theorem 1**).
Ist $\{M_n\}$ ein (Sub-/Super-) Martingal und T eine Stoppzeit, so ist $\{M_{\min(T,n)}\}$ auch ein (Sub-/Super-) Martingal.

Sei $\{M_n\}$ eine Folge von ZVen Seien $a < b$. Definiere

$$\begin{array}{lcl} N_0 & := & -1, \\ N_{2k-1} & := & \inf\{n > N_{2k-2} \,|\, M_n < a\}, \\ N_{2k} & := & \inf\{n > N_{2k} \,|\, M_n \geq b\} \end{array}$$

Die Anzahl der *Aufkreuzungen* ist dann

$$U_n := \max\{k \,|\, N_{2k} \leq n\}.$$

Satz (**Doob'sche Aufkreuzungsungleichung**).
Ist $\{M_n\}$ ein Submartingal, so gilt für alle $a < b$ und alle $n \geq 1$:

$$\mathbb{E}[U_n] \leq (\mathbb{E}[(M_n - a)^+] - \mathbb{E}[(M_0 - a)^+])/(b - a).$$

Satz (**Martingalkonvergenzsatz**).
Sei $\{M_n\}$ ein Submartingal mit $\sup_{n\geq 0}\mathbb{E}[M_n^+] < \infty$. Dann existiert eine ZV M_∞ mit $\mathbb{E}[|M_\infty|] < \infty$ sodass $M_n \to M_\infty$ fast-sicher.

Bsp (*Polya-Urne*). Urne mit b blauen und r roten Kugeln. In jeder Runde wird eine Kugel gezogen und mit einer weiteren Kugel gleicher Farbe zurückgelegt. Sei R_n di Anzahl von zugefügten roten Kugeln nach n Runden.
Man kann zeigen: $\{M_n := (r + R_n)/(r + b + n)\}_{n\geq 0}$ ist ein Martingal.
Außerdem gilt $\sup \mathbb{E}[M_n^+] \leq 1$ Nach dem vorherigen Satz gilt also $M_n \to M_\infty$ fast-sicher. Man kann zeigen, dass $M_\infty \sim \text{Beta}(r, b)$,

$$f_{M_\infty}(x) = \frac{1}{B(r,b)} x^{r-1}(1-x)^{b-1}.$$

Kor. Sei $\{M_n\}$ ein nichtnegatives Supermartingal.
Dann existiert $M_\infty \in L_1$ mit $M_n \to M_\infty$ fast-sicher.

Satz. Sei $\{M_n\}$ ein Submartingal und sei T eine Stoppzeit bzgl. derselben Filtration mit $P(T \leq N) = 1$ für ein $N \geq 1$. Dann gilt:

$$\mathbb{E}[M_0] \leq \mathbb{E}[M_T] \leq \mathbb{E}[M_N].$$

Satz (**Doob'sche Ungleichung**).
Sei $\{M_n\}$ ein Submartingal. Dann gilt:

$$P(\max_{k\leq n} M_k \geq \lambda) \leq 1/\lambda \cdot \mathbb{E}[M_n \mathbb{1}\{\max_{k\leq n} M_k \geq \lambda\}] \leq 1/\lambda \cdot \mathbb{E}[M_n^+].$$

Bem. Die Doob'sche Ungl. verbessert die Markov-Ungleichung.

Kor (**Kolmogorov-Ungleichung**). Seien $\{X_i\}$ unabh. ZVen mit $\mathbb{E}[X_i] = 0$ und $\mathbb{E}[X_i^2] < \infty$. Setze $S_k = X_1 + \ldots + X_k$. Dann gilt:

$$\mathbb{P}(\max_{k\leq n}|S_k| \geq \lambda) \leq \text{Var}(S_n)/\lambda^2.$$

Satz. Ist $\{M_n\}$ ein Submartingal, dann gilt für jedes $p \in (1, \infty)$:

$$\mathbb{E}[(\max_{k\leq n})^p] \leq (p/(p-1))^p \mathbb{E}[(M_n^+)^p]$$

Kor. Sei $\{M_n\}$ ein Martingal. Dann gilt für jedes $p \in (1, \infty)$:

$$\mathbb{E}[(\max_{k\leq n}|M_k|)^p \leq (p/(p-1))^p \mathbb{E}[|M_n|^p.]$$

Satz. Sei $\{M_n\}$ ein Martingal mit $\sup_{n\geq 1}\mathbb{E}[|M_n|^p] < \infty$ für ein $p > 1$. Dann konvergiert M_n fast-sicher und in L^p.

Def. Eine Familie $\{X_i\}_{i\in I}$ heißt **gleichgradig integrierbar**, falls

$$\forall\, \epsilon > 0 : \exists\, M > 0 : \forall\, i \in I : \mathbb{E}[|X_i|\mathbb{1}_{\{|X_i|>M\}}] < \epsilon.$$

Lem. Sei $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ ein Wkts-Raum, $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, P)$ und $\{\mathcal{A}_i\}_{i\in I}$ eine Famile von σ-Algebren mit $\mathcal{A}_i \subseteq \mathcal{F}$ für alle $i \in I$.
Dann ist die Familie $\{\mathbb{E}[X|\mathcal{A}_i]\}_{i\in I}$ gleichgradig integrierbar.

Lem. Sei $\{\mathcal{F}_n\}$ eine Filtration und $X \in L^1$. Dann ist $\{M_n\}$ mit $M_n := \mathbb{E}[X|\mathcal{F}_n]$ ein gleichgradig integrierbares Martingal.

Satz. Für jedes Martingal $\{M_n\}$ (bzgl. $\{\mathcal{F}_n\}$) sind äquivalent:
- $\{M_n\}$ ist gleichgradig integrierbar
- $\{M_n\}$ konvergiert fast sicher und in L^1
- $\{M_n\}$ konvergiert in L^1
- $\{\exists\, M \in L^1 : \forall\, n \geq 0 : M_n = \mathbb{E}[M|\mathcal{F}_n]\}$

Satz. Sei $\{\mathcal{F}_n\}$ eine Filtration. Betrachte $\mathcal{F}_\infty := \sigma(\cup_{n=0}^\infty \mathcal{F}_n)$

Bsp. Seien $\{X_i\}$ unabhängig und $\tau := \cap_{n\geq 1}\sigma(X_n, X_{n+1}, \ldots)$ die terminale σ-Algebra. Dann folgt aus dem vorh. Satz, dass $P(A) \in \{0,1\}$ für alle $A \in \tau$.

Bsp. Betrachte eine Lipschitz-stetige Funktion $f : [0,1) \to \mathbb{R}$. Setze

$$\begin{aligned} X_n &:= \textstyle\sum_{k=1}^{2^n} (k-1)/2^n \mathbb{1}\left[(k-1)/2^n, k/2^n\right), \\ M_n &:= 2^n(f(X_n + 1/2^n) - f(X_n)). \end{aligned}$$

Dies sind ZVen auf $\Omega = [0,1)$ mit dem Lebesgue-Maß. Dann ist $\{M_n\}$ ein gleichgradig integrierbares Martingal. Somit gibt es ein $M \in L^1$ mit $M_n \xrightarrow{n\to\infty} M$ fast-sicher und in L^1. Es gilt dann

$$f(x) - f(0) = \int_0^x M(t)\,\mathrm{d}t \quad \text{für alle } x \in [0,1)\,.$$

Satz. Sei T eine Stoppzeit. Falls

- $\{M_n\}$ ein gleichgradig integrierbares Submartingal ist *oder*
- $\mathbb{E}[|M_T|] < \infty$ und $\{M_n \mathbb{1}\{T > n\}\}$ gleichgradig integrierbar sind,

so ist die Folge $\{M_{T\wedge n}\}$ ebenfalls gleichgradig integrierbar.

Satz. Sei $\{M_n\}$ ein gleichgradig integrierbares Submartingal. Dann gilt für jede Stoppzeit T:

$$\mathbb{E}[M_0] \leq \mathbb{E}[M_T] \leq \mathbb{E}[M_\infty].$$

Satz (Optional Stopping Theorem 2). Seien $S \leq T$ zwei Stoppzeiten. Ist $\{M_{T\wedge n}\}$ ein gleichgradig integrierbares Submartingal, so gilt

$$M_S \leq \mathbb{E}[M_T|\mathcal{F}_S].$$

Rekurrenz/Transienz mit Martingaltheorie

Sei $\{Y_n\}$ eine Folge nichtnegativer ZVen.

Def. $\{Y_n\}$ heißt **(topologisch) rekurrent**, falls

$$\exists\, r > 0 \,:\, P(\liminf_{n\to\infty} Y_n \leq r) = 1.$$

$\{Y_n\}$ heißt **(topologisch) transient**, falls $P(\lim_{n\to\infty} Y_n = \infty) = 1$.

Satz. Sei $\{Y_n\}$ eine Folge mit $P(\limsup_{n\to\infty} Y_n = \infty) = 1$. Falls ein $M > 0$ mit $\mathbb{E}[Y_{n+1}|Y_n = x_n, \ldots, Y_0 = x_0] \leq x_n$ für alle $x_n \geq M$ existiert, so ist $\{Y_n\}$ rekurrent.

Definiere $U_n^{(k)} := Y_{k+n} \cdot \mathbb{1}\{\min(Y_k, Y_{k+1}, \ldots, Y_{n+k-1}) \geq M\}$.

Lem. Unter Vor. des Satzes: Sei $\mathcal{F}_n^{(k)} := \sigma(Y_0, Y_1, \ldots, Y_{n+k})$. Dann ist $\{U_n^{(k)}\}$ ein Supermartingal bzgl. $\{F_n^{(k)}\}$.

Satz. Sei $\{Y_n\}$ und $T > 0$ mit $P(Y_n \leq T) = 1$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und $P(\limsup_{n\to\infty} Y_n = T) = 1$. Falls $\mathbb{E}[Y_{n+1}|Y_n = x_n, \ldots, Y_0 = x_0] \geq x_n$ für alle $n \in \mathbb{N}$ und $x_n \geq M$ für ein $M < T$, so gilt: $Y_n \xrightarrow{n\to\infty} T$ fast-sicher.

Im Folgenden sei $\tau := \inf\{n \geq 1 \,|\, Y_n \leq r\}$.

Satz. Angenommen, für die Folge $\{\tilde{Y}_n\}$ mit $\tilde{Y}_n := Y_{n\wedge\tau}$ gilt

$$\mathbb{E}[\tilde{Y}_{n+1}|\sigma(Y_0, \ldots, Y_n)] \leq \tilde{Y}_n - \epsilon\mathbb{1}\{\tau > n\} \quad \text{für ein } \epsilon > 0.$$

Dann gilt für jeden konst. Startwert Y_0 die Ungleichung

$$\mathbb{E}[\tau] \leq Y_0/\epsilon < \infty.$$

Satz. Falls $Y_0 > r$ und $\mathbb{E}[\tilde{Y}_{n+1}|\sigma(Y_0, \ldots, Y_n)] \geq \tilde{Y}_n$ gilt und ein $M > 0$ mit $\mathbb{E}[|\tilde{Y}_{n+1} - \tilde{Y}_n||\sigma(Y_0, \ldots, Y_n)] \leq M$ fast-sicher existiert, so gilt $\mathbb{E}[\tau] = \infty$.

Sei $\{Z_n\}$ eine Markovkette auf $\mathbb{N}_0$.
Definiere $m_1(x) := \mathbb{E}[Z_1 - Z_0|Z_0 = x] = \sum_{k\in\mathbb{Z}} kp(x, x+k)$ und $m_2(x) := \mathbb{E}[(Z_1 - Z_0)^2|Z_0 = x] = \sum_{k\in\mathbb{Z}} k^2 p(x, x+k)$.

Bem. Falls $m_1(x) \leq -\epsilon$ für alle $x \geq x_0$, so können wir direkt Satz 4.5 verwenden: Die Stoppzeit $\tau_r := \min\{n \geq 0 \,|\, Z_n \leq r\}$ hat endlichen Erwartungswert für jedes $r \geq x_0$.

Frage. Was passiert in dem Fall, wenn $m_1(x)$ von Null nicht getrennt ist? Hier hängt vieles von $m_2(x)$ ab.

Satz. Falls es ein $\epsilon > 0$ gibt mit

$$\forall\, x \geq x_0 \,:\, 2xm_1(x) + m_2(x) \leq -\epsilon,$$

so ist die Kette $\{Z_n\}$ positiv rekurrent.

Beweisidee. Betrachte $Y_n = Z_n^2$. Dann gilt

$$\mathbb{E}[Y_{n+1} - Y_n|\sigma(Z_0, \ldots, Z_n)] \leq -\epsilon \quad \text{auf } \{Y_n \geq x_0^2\}.$$

Somit ist $\{Y_n\}$ nach Satz 4.5 und damit auch $\{Z_n\}$ rekurrent.

Falls $m_1(x) \sim -c/x$ und $m_2(x) \sim 1$, so ist $2xm_1(x) + m_2(x) \sim 1 - 2c$. Falls $c > \frac{1}{2}$, so ist die Kette positiv rekurrent.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible Kette mit $|Z_{n+1} - Z_n| \leq B$ fast-sicher für alle n für ein $B > 0$. Außerdem gelte $\inf_x m_2(x) > 0$.

- Falls $2xm_1(x) \leq (1-\epsilon)m_2(x)$ für alle $x \geq x_1$, so ist $\{Z_n\}$ rekurrent.
- Falls $2xm_1(x) \geq (1+\epsilon)m_2(x)$ für alle $x \geq x_2$, so ist die Kette $\{Z_n\}$ transient.

Bsp. Sei $\{Z_n\}$ eine einfache Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^d$ mit $Z_{n+1} - Z_n \in U_d = \{\pm e_1, \ldots, \pm e_d\}$, alle gleich wahrscheinlich.
Wir wissen: $\{Z_n\}$ ist rekurrent $\iff$ $d \leq 2$ Dies können wir auch wie folgt zeigen:
Betrachte $X_n := \|Z_n\|$. Dann ist

$$\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n|Z_n = x] = \ldots = \tfrac{1/2 - 1/d}{\|x\|} + O(1/\|x\|^2)$$

und

$$\mathbb{E}[(X_{n+1} - X_n)^2|Z_n = x] = \ldots = 1/d + O(1/\|x\|)$$

Für $d = 1$ ist also

$$\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n|X_n = x] \leq (1-\epsilon)\mathbb{E}[(X_1 - X_0)^2|Z_0 = x]/(2\|x\|)$$

Mit Hilfe von $Y_n := \log(1 + X_n)$ erhalten wir, dass $\{X_n\}$ rekurrent ist. Bei $d \geq 3$ gilt

$$\mathbb{E}[X_{n+1} - X_n|Z_n = x] \geq (1+\epsilon)\mathbb{E}[(X_1 - X_0)^2|Z_0 = x]/(2\|x\|)$$

Für $d = 2$ können wir den vorh. Satz leider nicht benutzen. Man kann den Satz aber verbessern, sodass aus

$$2xm_1(x) \leq (1 + \tfrac{1-\epsilon}{\log x})m_2(x)$$

schon Rekurrenz folgt.

Lem. Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible abzählbare Markovkette. Falls es eine endliche Menge $A \subseteq E$ mit

$$\mathbb{E}[\tau_A|Z_0 = x] < \infty \quad \forall\, x \in A$$

gibt, so ist $\{Z_n\}$ positiv rekurrent.

Satz (Kriterium von Foster). Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible abzählbare Markovkette. Dann sind äquivalent:

- Die Kette $\{Z_n\}$ ist positiv rekurrent.
- Es gibt eine Abbildung $f : E \to \mathbb{R}_{\geq 0}$, ein $\epsilon > 0$ und eine endliche Teilmenge $A \subseteq E$ mit

$$\begin{aligned} &\forall\, x \in E : && \mathbb{E}[f(Z_1)|Z_0 = x] < \infty \\ \text{und} \quad &\forall\, x \in E \setminus A : && \mathbb{E}[f(Z_1) - f(Z_0)|Z_0 = x] \leq -\epsilon. \end{aligned}$$

Bem. Man kann sogar immer $\epsilon = 1$ und $|A| = 1$ erreichen.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine irr. Markovkette auf E, E abzählbar. Dann gilt:

$$\{Z_n\} \text{ ist transient} \iff \exists\, A \neq \emptyset \subset E : \exists\, f : E \to \mathbb{R}_{\geq 0} : \begin{array}{l} \inf_{x\in E} f(x) < \inf_{x\in A} f(x), \\ \forall\, x \in E \setminus A : \mathbb{E}[f(Z_1) - f(Z_0) \,|\, Z_0 = x] \leq 0. \end{array}$$

Lem. Im Kontext der rechten Seite des Satzes:
Sei $y \in E \setminus A$ mit $y < \inf_{x\in A} f(x)$. Dann gilt:

$$\mathbb{P}(\tau_A < \infty \mid Z_0 = y) \le f(y)/\inf_{x\in A} f(x).$$

Kor. Sei $\{Z_n\}$ eine irr. Markovkette auf E, E abzählbar. Dann gilt:

$$\{Z_n\} \text{ ist transient} \iff \exists\, x_0 \in E \,:\, \exists\, h : E \to \mathbb{R} \,:\, \begin{array}{l} h \text{ beschränkt, nicht konstant und} \\ \forall\, x \ne x_0 \,:\, \mathbb{E}[f(Z_1) - f(Z_0) \mid Z_0 = x] = 0. \end{array}$$

Def. Eine Funktion $f : X \to \mathbb{R}$ (mit $|X| = \infty$) heißt **unbeschränkt**, falls $\sup_{x\in B} f(x) = \infty$ für jede unendliche Teilmenge $B \subseteq X$.

Satz. Sei $\{Z_n\}$ eine irr. Markovkette auf E, E abzählbar. Dann gilt:

$$\{Z_n\} \text{ ist rekurrent} \iff \begin{array}{l} \exists \text{ endliche Teilmenge } A \subset E \,: \\ \exists \text{ unbeschränkte Funktion } f : E \to \mathbb{R}_{\ge 0} \,: \\ \quad \forall\, x \in E \setminus A \,:\, \mathbb{E}[f(Z_1) - f(Z_0) \mid Z_0 = x] \le 0. \end{array}$$

Harmonische Fktn für Übergangskerne

Def. $P = (p(x,y))_{x,y\in E}$ heißt **substochast. Übergangskern**, falls

- $p(x,y) \ge 0$ für alle $x, y \in E$ und
- $\sum_{y\in E} p(x,y) \le 1$ für alle $x \in E$.

Er heißt *strikt substochastisch*, falls $\sum_{y\in E} p(x_0, y) < 1$ für mindestens ein $x_0 \in E$.

Notation. Für $h : E \to \mathbb{R}$ sei $Ph : E \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$(Ph)(x) := \sum_{y\in E} p(x,y) h(y).$$

(Annahme dabei: h ist *integrierbar*, d. h. $\sum_{y\in E} p(x,y)|h(y)| < \infty$.)

Def. Eine integrierbare Funktion $h : E \to \mathbb{R}$ heißt

$$\left\{ \begin{array}{r} \textbf{harmonisch} \\ \textbf{superharmonisch} \end{array} \right\} \text{ falls } h(x) \left\{ \begin{array}{c} = \\ \ge \end{array} \right\} (Ph)(x) \;\; \forall\, x \in E.$$

h heißt *strikt superharmonisch*, falls $h(x_0) > \sum_{y\in E} p(x_0, y) h(y)$ für mindestens ein $x_0 \in E$.

Bsp. Bei Diskretisierung der Laplace-Gleichung auf $\mathbb{R}^2$ mit der Finite-Differenzen-Methode erhält man das Gleichungssystem

$$Ph = h,$$

wobei P der stochastische Übergangskern der einfachen symmetrischen Irrfahrt auf $\mathbb{Z}^2$ ist.

Bsp. Sei $\{Z_n\}$ eine irreduzible Irrfahrt auf $\mathbb{Z}$. Setze

$$h(x) := \mathbb{P}(\forall\, n \ge 0 \,:\, Z_n > 0 \mid Z_0 = x) \quad \text{für } x \in \mathbb{Z}.$$

Dann ist h harmonisch für den substochastischen Übergangskern

$$P(x,y) := p(x,y) \mathbb{1}\{x \ge 1, y \ge 1\}.$$

Verfahren. Falls P substochastisch ist, so kann man die Gleichung für harmonische Fktn zu einer Gleichung mit einem stochastischen (aber leider nicht irreduziblen) Kern umformulieren: Setze

$$E' := E \sqcup \{\dagger\}$$

und definiere $p' : E' \times E' \to [0,1]$ für $x, y \in E$ durch

$$\begin{array}{ll} p'(x,y) := p(x,y), & p'(x,\dagger) := 1 - \sum_{y\in E} p(x,y), \\ p'(\dagger, y) := 0, & p'(\dagger,\dagger) = 1. \end{array}$$

Beachte: p' ist stochastisch. Für $h : E \to \mathbb{R}$ sei $h' : E' \to \mathbb{R}$ def. durch

$$h'|_E := h \quad \text{und} \quad h'(\dagger) := 0.$$

Dann gilt für alle $h : E \to \mathbb{R}$:

$$h \text{ ist harmonisch für } p \iff h' \text{ ist harmonisch für } p'.$$

Bem. Ist P stochastisch, so ist jede Konstante harmonisch.
Ist P strikt substochastisch, so ist jede Konstante $\ne 0$ strikt superharmonisch.

Bsp. Sei P ein substochastischer Kern und

$$G(x,y) := \sum_{n=0}^{\infty} p^{(n)}(x,y)$$

die *Greensche Funktion*. Für festes $y \in E$ betrachte die Funktion

$$h_y(x) := G(x,y).$$

Ist y *transient* (d. h. $G(y,y)$), so ist h_y superharmonisch. Ist P *irreduzibel* (d. h. $\forall\, x, y \in E \,:\, \exists\, n \ge 1 \,:\, p^{(n)}(x,y) > 0$), so gilt außerdem $h_y(x) > 0$ für alle $x \in E$.

Lem (*Maximumsprinzip*)**.** Sei P irreduzibel, substochastisch und h harmonisch für P. Falls ein Zustand $x_0 \in E$ mit

$$M := h(x_0) = \max_{x\in E} h(x)$$

existiert, so ist $h \equiv M$ konstant.
Ferner gilt: Falls $M \ne 0$, so ist P stochastisch.

Lem. Sei P irreduzibel und $h \ge 0$ superharmonisch. Dann gilt:

- $P^{(n)} h$ ist superharmonisch für alle $n \ge 0$.
- Entweder ist $h \equiv 0$ konstant oder $\forall\, x \in E \,:\, h(x) > 0$.

Lem. Sei $\{h_i\}_{i\in I}$ eine Familie von superharmon. Funktionen.
Ist $h(x) := \inf_{i\in I} h(x)$ integrierbar, so ist auch h superharmonisch.