

# Fraktale Kurven Zeichnen mit LEGO® Mindstorms

Margarete Ketelsen

## Die LEGO® Roboter

Der **BANNER PRINT3R** malt die fraktalen Kurven auf einen Kassenzettel. Dazu kann der Kassenzettel vor und zurück, und der Stift von rechts nach links bewegt werden. Die Muster sind relativ klein und es können nur Kurven mit rechten Winkeln gezeichnet werden. Diese werden dafür recht exakt gezeichnet.



Bauanleitung  
BANNER PRINT3R



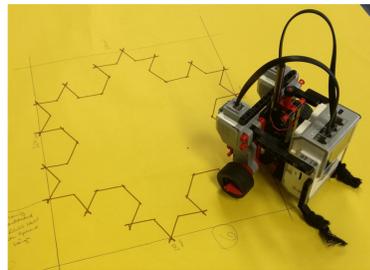
Bauanleitung Plot Bot

Der **Plot Bot** fährt auf einem großen Blatt Papier herum und versieht dieses so mit den fraktalen Kurven. Da sich der Roboter frei auf dem Papier bewegen kann, sind in diesem Fall Kurven mit beliebigen Winkeln möglich. Die Muster werden relativ groß, allerdings sind die Winkel oft nicht sehr exakt, da die tatsächliche Drehung der Roboters stark vom Untergrund abhängig ist.

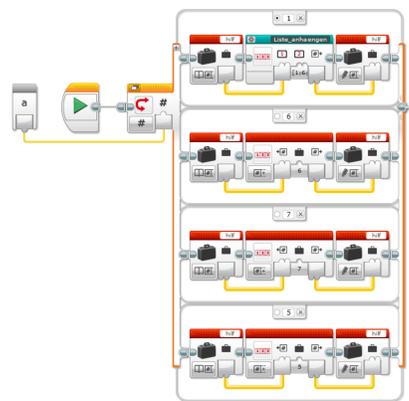
Die beiden Roboter wurden auf Grundlage dieser Anleitungen gebaut und anschließend verbessert. Die Konstruktionen aus der Anleitung waren schlicht zu instabil und nicht exakt genug um unsere filigranen Muster zu zeichnen. Wir haben wackelige Konstruktionen unter anderem durch Zahnräder ersetzt und mit Hilfe von gespannten Gummis stabilisiert.

BANNER PRINT3R

Plot Bot



## Die Programmierung



Implementierung der Lindenmayer-Ersetzungsregeln für die Wunderlich-Kurve

Die Roboter wurden mit der LEGO® MINDSTORMS EV3 Home Edition Software programmiert. Dabei handelt es sich um eine **visuelle** Programmierumgebung, d.h. statt der sonst üblichen Code-Zeilen werden Blöcke aneinandergesetzt.

Besonders interessant sind die **myBlocks**. Hiermit lassen sich eigene Subroutinen schreiben. Die LEGO-Software unterstützt allerdings **keine rekursive Programmierung**. Deswegen wurden die fraktalen Kurven durch **iterative Programmierung** mit Hilfe von **Lindenmayer-Systemen** implementiert.

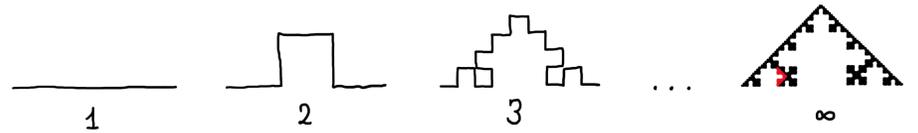
## Anwendung: Wärmetauscher

Das Projekt **instaf** (integrated structures for additive manufacturing) ist ein Kooperationsprojekt mit Partnern aus Deutschland und Österreich und befasst sich mit dem Design und der Entwicklung neuer Strukturen für **Wärmetauscher**.

Wärmetauscher sind besonders effizient, wenn der Wärmeaustausch an einer besonders **großen Oberfläche** stattfindet. Die Idee ist, die raumfüllenden Kurven zu verwenden, um zwei Flüssigkeiten zu trennen. Dazu werden aufeinanderfolgende Iterationsstufen einer Kurve hintereinander geplottet, verbunden und geglättet.

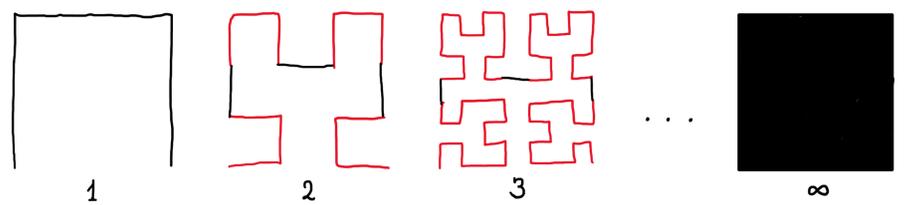


## Fraktale und raumfüllende Kurven



**Fraktale** entstehen durch ein wiederholtes **Verkleinern**, **Vervielfältigen** und **Ersetzen** – und zwar theoretisch **unendlich oft**. Wir brechen nach endlich vielen Schritten ab, und erhalten so ein komplexes Gebilde, welches ein Computer jedoch einfach berechnen kann. Fraktale sind selbstähnlich: Sie enthalten verkleinerte Kopien von sich selbst. Auch in der Natur kommen häufig fraktalähnliche Strukturen vor.

Bei den **raumfüllenden Kurven** entsteht nach unendlich vielen Wiederholungsschritten kein kompliziertes Gebilde, sondern einfach nur eine ausgefüllte Fläche.



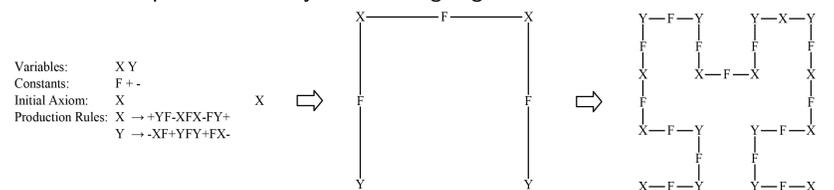
Trotz ihrem auf den ersten Blick **komplizierten** Erscheinungsbild, können Fraktale von relativ einfachen Algorithmen am Computer erzeugt werden. Dazu können **rekursive** Algorithmen oder **iterative** Algorithmen verwendet werden.

## Lindenmayer-Systeme

Ein **Lindenmayer-System** erzeugt Codes zum zeichnen von fraktalen Kurven durch wiederholtes Ersetzen von Zeichenketten nach vorgegebenen **Ersetzungsregeln**.

Für viele verschiedene Fraktale und raumfüllende Kurven sind diese Ersetzungsregeln bekannt und können verwendet werden, um mit Hilfe eines iterativen Algorithmus entsprechende Codes zu erzeugen.

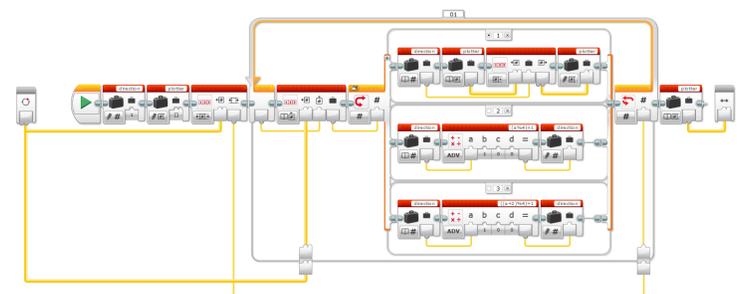
Beispiel: Lindenmayer-Ersetzungsregeln für die Hilbertkurve



Die Lindenmayer-Systeme generieren Anweisungen für den Plot Bot, bestehen also aus einer Aneinanderreihung von Anweisungen zum

- vorwärts fahren
- nach rechts drehen
- nach links drehen

Für den BANNER PRINT3R müssen diese Anweisungen anschließend noch in vor- und rückwärts-Bewegungen für den Kassenzettel und rechts-links-Bewegungen für den Stift übersetzt werden.



Übersetzung der Turtle-Commands aus dem Lindenmayer-System in Commands für den BANNER PRINT3R

## Publikation

Noack, K., Päßler, R., Ketelsen, M., Lordick, D. (2021). The Use of LEGO® Robots to Visualize the Design Process of High-Performing Heat Exchangers. In: Cheng, LY. (eds) ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics. ICGG 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1296. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2_38)

Dieses Projekt entstand während meinem 2. Semester im Rahmen einer SHK-Tätigkeit in der Arbeitsgruppe *Geometrische Modellierung und Visualisierung* von Prof. Daniel Lordick.