Informatik I: Einführung in die Programmierung

16. Ausnahmen, Generatoren und Iteratoren, Backtracking

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Prof. Dr. Peter Thiemann

07.01.2025

1 Prolog: Ausnahmen (Exceptions)

- Ausnahmen
- `try-except`
- `try-except-else`-Blöcke
- `finally`-Blöcke
- `raise`-Anweisung

Ausnahmen (1)

- In vielen Beispielen sind uns *Tracebacks* wie der folgende begegnet:

```
>>> print({"spam": "egg"}["parrot"])
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
KeyError: 'parrot'
```

- Solche Fehler heissen Ausnahmen (*exceptions*).
- Jetzt wollen wir Ausnahmen abfangen und selbst melden.

Ausnahmen (2)

Anwendungen von Ausnahmen

1. Signalisieren einer Situation, die nicht spezifiziert ist.
   Meist im Zusammenhang mit externen Ereignissen.
   Beispiel: physikalischer Fehler beim Lesen einer Datei, mangelnder Speicherplatz, etc
2. Vereinfachte Behandlung des “Normalfalls” einer Funktion. Die Ausnahme wird dabei als alternativer Rückgabewert verwendet.

Ausnahmen (3)

Beispiele

exception OSError (1) This exception is raised when a system function returns a system-related error, including I/O failures such as “file not found” or “disk full” (not for illegal argument types or other incidental errors).

exception RecursionError (1) This exception is raised when the interpreter detects that the maximum recursion depth is exceeded.

exception IndexError (2) Raised when a sequence subscript is out of range.

exception KeyError (2) Raised when a mapping (dictionary) key is not found in the set of existing keys.

Ausnahmen (4)

- Das Auslösen einer Ausnahme bricht den normalen Programmablauf ab.
- Stattdessen beginnt ab der Stelle, wo die Ausnahme ausgelöst wurde, die Suche nach der Ausnahmebehandlung mit der Anweisung `try` mit Optionen `except`, `finally` und `else`.
- Wird die Ausnahme nicht innerhalb des aktuellen Funktionsaufrufs behandelt, so wird der Funktionsaufruf beendet, der zugehörige Kellerrahmen entfernt und die Ausnahme wird an den Aufrufer der Funktion hochgereicht. Dabei wird kein Rückgabewert bestimmt!
- Dort wird die Suche nach einer `try` Anweisung beginnend nach dem Aufruf der Funktion fortgesetzt.
- Das geschieht solange, bis sich ein Kellerrahmen findet, in dem die Ausnahme behandelt wird.

Ausnahmen (5)

- Ausnahmen sind selbst Objekte.
- Sie sind Instanzen von Subklassen der Klasse `BaseException`.
- Die Subklasse `Exception` dient als Basisklasse für selbstdefinierte Ausnahmen.

try-except

Eine `try-except`-Anweisung behandelt Ausnahmen, die während der Ausführung des **`try`**-Blocks auftreten. Wenn dort keine Ausnahme ausgelöst wurde oder die Ausnahme in einer der `except`-Klauseln bearbeitet wurde, geht es nach der `try`-Anweisung einfach weiter.

```
try:
    critical_code()
except NameError as e:
    print("Sieh mal einer an:", e)
except KeyError:
    print("Oops! Ein KeyError!")
except (IOError, OSError):
    print("Na sowas!")
except:
    print("Ich verschwinde lieber!")
    raise
```

except-Blöcke (1)

`except XYError:`

Ein solcher Block wird ausgeführt, wenn innerhalb des `try`-Blocks eine Ausnahme ausgelöst wird, die eine Instanz von `XYError` (oder Subklasse) ist.

`except XYError as e:`

Wie oben; zusätzlich wird das Ausnahmeobjekt an die Variable `e` zugewiesen.

`except (XYError, YZError):`

Ein Tupel fängt mehrere Ausnahmetypen gemeinsam ab: sowohl `XYError` als auch `YZError`.

`except:`

So werden unspezifisch alle Ausnahmen abgefangen.

except-Blöcke (2)

- Die except-Blöcke werden der Reihe nach abgearbeitet, bis der erste passende Block gefunden wird (falls überhaupt einer passt).
- Unspezifische except-Blöcke sind daher nur an letzter Stelle sinnvoll.
- In einem except-Block kann die abgefangene Ausnahme mit einer raise-Anweisung ohne Argument weitergereicht werden.

try – except – else

Ein `try-except`-Block kann mit einem `else`-Block abgeschlossen werden, der ausgeführt wird, falls im `try`-Block keine Ausnahme ausgelöst wurde:

```
try:
    critical_code()
except IOError:
    print("IOError!")
else:
    print("Keine Ausnahme")
```

finally-Blöcke

- Wenn eine Ausnahme nicht behandelt werden kann, müssen trotzdem oft Ressourcen freigegeben werden — etwa um Netzwerkverbindungen zu schließen.
- Dazu dient der `finally`-Block:

```
try:
    critical_code()
finally:
    print("Ich komme zurück...")
```

- Der `finally`-Block wird *immer* beim Verlassen des `try`-Blocks ausgeführt:
  - Bei einem `return` im `try`-Block wird der `finally`-Block vor Rückgabe des Ergebnisses ausgeführt.
  - Bleibt eine Ausnahme auch nach Bearbeitung der `try`-Anweisung bestehen, so wird sie nach Ausführung des `finally`-Blocks weitergegeben.

Beispiel

kaboom.py

```
def kaboom(x, y):
    print(x + y)

def tryout():
    kaboom("abc", [1, 2])

try:
    tryout()
except TypeError as e:
    print("Hello world", e)
else:
    print("All OK")
finally:
    print("Cleaning up")
print("Resuming ...")
```

Die `raise`-Anweisung

- Die `raise`-Anweisung signalisiert eine Ausnahme.
- **`raise`** hat als optionales Argument ein `Exception` Objekt.
- Beispiele

```
raise KeyError("Fehlerbeschreibung")
raise KeyError()
raise KeyError
```

.

- `raise` ohne Argument dient zum Weiterreichen einer Ausnahme in einem **`except`**-Block.

2 Generatoren

- Anwendung von Generatoren

Das Geheimnis von `range` & Co

```
>>> for i in range(3): print(i)
...
0
1
2
>>> rng = range(3)
>>> rng
range(0, 3)
>>> for i in rng: print(i)
...
0
1
2
```

Beobachtungen

- `range(3)` liefert keine Liste, sondern ein spezielles Objekt.
- Dieses Objekt kann durch `for` zum “Durchlaufen” einer Sequenz von Werten gebracht werden.
- Dieses Verhalten ist in Python eingebaut, aber es ist auch programmierbar.
- Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten u.a.
  - Generatoren
  - Iteratoren

Ein Generator für `range`

```
>>> from typing import Iterator
>>> def myRange(n : int) -> Iterator[int]:
...     """ generator that counts from 0 to n-1 """
...     i = 0
...     while i<n:
...         yield i
...         i = i+1
...
```

- Neue Anweisung: `yield`. Ihr Vorkommen bewirkt, dass der Funktionsaufruf `myRange(3)` als Ergebnis einen Generator liefert.
- Ein Generator ist ein Objekt, das eine Folge von Werten erzeugt, die mit der Funktion `next()` einmal durchlaufen werden kann.
- Typ eines Generators (vereinfacht): `Iterator[T]`, wobei T der Typ vom Argument von `yield` ist.

Action: Die Funktion `next`

```
>>> mr = myRange(2)
>>> next(mr)
0
>>> next(mr)
1
>>> next(mr)
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
StopIteration
```

- Intuitiv “läuft” `myRange` beim ersten Aufruf von **`next`** bis zum **`yield`**.
- Beim nächsten **`next`** läuft es an dieser Stelle weiter bis zum nächsten **`yield`**.

Das Generatorobjekt

- Führt Buch über den Stand der Ausführung des Generators.
- Stand der Ausführung = Kellerrahmen: Belegung der lokalen Variablen und Parameter, sowie die als nächstes auszuführende Anweisung.
- Bei Konstruktion (d.h. Aufruf der Generatorfunktion) wird ein Generatorobjekt erzeugt:
  - Kellerrahmen mit den übergebenen Parametern,
  - erste Anweisung des Funktionsrumpfes.
  - Die Generatorfunktion läuft noch nicht los!
- Beispiel: Beim Aufruf von `gen = myRange (3)` enthält das Generatorobjekt
  - Parameter `n = 3`
  - Nächste Anweisung ist `i = 0`

Verwendung von Generatoren (Methoden)

Aufruf von `next(gen)`

1. Restauriere den zuletzt gespeicherten Stand der Ausführung.
2. Fahre dort fort mit der Ausführung des Rumpfes des Generators (Bsp: Funktionsrumpf von `myRange`).
3. Führe aus bis zum nächsten `yield`:
   - Speichere den aktuellen Stand der Ausführung im Generator.
   - Liefere das Argument von `yield` als Ergebnis.
4. Falls das Ende des Rumpfs ohne `yield` erreicht wird:
   - Speichere den aktuellen Stand der Ausführung im Generator.
   - Löse die Ausnahme `StopIteration` aus.

Iteratoren als Argumente von Funktionen

- Viele Funktionen erlauben Iteratoren als Argumente, z.B. die Funktion `list`:

```
>>> mr = myRange(2)
>>> list(mr)
[0, 1]
>>> list(mr)
[]
```

- Intern baut sie die Ergebnisliste durch wiederholtes Aufrufen von `next` auf, bis `StopIteration` ausgelöst wird.
- Auch eine `for`-Schleife kann durch einen Iterator gesteuert werden:

```
>>> for i in myRange(3): print(i, end=' ')
...
0 1 2
```

Ein Generator muss nicht endlich sein

```
def upFrom(n:int) -> Iterator[int]:
    while True:
        yield n
        n = n + 1
```

Python-Interpreter

```
>>> uf = upFrom(10)
>>> next(uf)
10
>>> next(uf)
11
>>> list(uf)
^CTraceback (most recent call last):
File "<stdin>", line 1, in <module>
File "<stdin>", line 3, in upFrom
KeyboardInterrupt
```

Abfragen eines (potentiell) unendlichen Generators

Zu Fuß mit Ausnahmen

```
def printGen(gen: Iterator[Any]):
    try:
        while True:
            v = next(gen)
            print(v)
    except StopIteration:
        pass
```

Elegant mit `for`-Schleife

```
def printGenFor(gen: Iterator[Any]):
    for v in gen:
        print(v)
```

Zwei weitere Beispiele: map und filter

```
def myMap[A,B](f : Callable[[A], B],
               seq : Iterator[A]
              ) -> Iterator[B]:
    for x in seq:
        yield f (x)


def twox1 (x : int) -> int:
    return 2*x+1

printGenFor(
    myMap(twox1, upFrom(10)))
```

Was wird gedruckt?

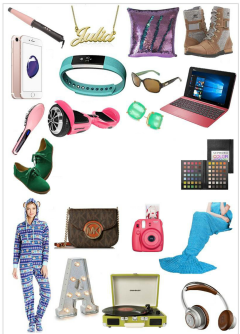
```
def myFilter[A](p : Callable[[A], bool],
                seq : Iterator[A]
               ) -> Iterator[A]:
    for x in seq:
        if p(x):
            yield x

def div3 (x : int) -> bool:
    return x % 3 == 0

printGenFor(
    myFilter(div3, upFrom(0)))
```

Was wird gedruckt?

Anwendung von Generatoren

Ein Problem

Nanga Eboko will seine Schwester in Kamerun besuchen. Sein Koffer darf 23kg wiegen, die er mit Geschenken komplett ausnutzen will.



Sublisten

Definition: Subliste

Sei $L = [x_1, \ldots, x_n]$ eine Liste. Eine Subliste von L hat die Form $[x_{i_1}, \ldots, x_{i_k}]$ und ist gegeben durch eine Folge von Indizes $i_1 < i_2 < \cdots < i_k$ mit $i_j \in \{1, \ldots, n\}$.

Beispiel: Sublisten von $L = [1,5,5,2,1,7]$

$L_1 = [1,5,5,2,1,7]$ $L_2 = [1,5,1,7]$ $L_3 = [5,5]$

$L_4 = [1,2]$ $L_5 = [2,1]$ $L_6 = []$

keine Sublisten von L:

$[1,2,8]$ $[2,5,1]$

Fakt

Es gibt 2^n Sublisten von $L = [x_1, \ldots, x_n]$, wenn alle x_i unterschiedlich sind.

Das Rucksackproblem

Ein spezielles 0/1 Rucksackproblem

Gegeben ist eine Liste L von positiven ganzen Zahlen (Gewichten) und ein Zielgewicht S. Gibt es eine Subliste von L, deren Summe exakt S ergibt?

Ein schweres Problem

- Der naive Algorithmus probiert alle maximal möglichen $2^{len(L)}$ Sublisten durch.
- Es ist nicht bekannt, ob es für dieses Problem einen effizienteren Algorithmus gibt.

Ein rekursiver Algorithmus mit Generatoren

```python
def knapsack[A](goal : int, items : list[tuple[A,int]]) -> Iterator[list[A]]:
    if goal == 0:
        yield []                              # solution found
    elif not items:
        return                                # out of items, no solution
    else:
        item0, weight = items[0]
        remaining_items = items[1:]
        yield from knapsack (goal, remaining_items) # solutions without item0
        if weight <= goal:
            for solution in knapsack (goal - weight, remaining_items):
                yield [item0] + solution
```

Beispielhafte Eingabe (Dictionary)

```
gifts = {'phone': 200, 'boots': 1200, 'laptop': 2200, 'glasses': 50,
         'camera': 150, 'jumpsuit': 2340, 'headphones': 80, 'fitbit': 40,
         'hanger': 10, 'pillow': 400, 'hoverboard': 870, 'handbag': 430}
```

Neu und wichtig

- Wird der Rumpf eines Generators mit `return` beendet, löst der Generator eine `StopIteration`-Ausnahme aus.
- Anstelle des Dictionaries wird `list(gifts.items())` übergeben, eine Liste von key-value-Paaren.
- `yield from gen` entspricht der Schleife

```
for x in gen: yield x
```

- Der Algorithmus verwendet Backtracking:
  - Ein Lösungsansatz wird Schritt für Schritt zusammengesetzt.
  - Erweist sich ein Ansatz als falsch, so werden Schritte zurückgenommen (Backtracking) bis ein alternativer Schritt möglich ist.
- Mit rekursiven Generatoren und dem Verzicht auf Änderungen in der Datenstruktur ist die Rücknahme von Schritten besonders einfach.

3 Iteratoren

Iterierbare Objekte

- Ein Objekt heißt Container-Objekt, falls es untergeordnete Objekte verwaltet.
- Die `for`-Schleife kann für viele Container-Objekte die Elemente durchlaufen.
- Dazu gehören Sequenzen, Tupel, Listen, Strings, Dictionaries, Mengen usw:

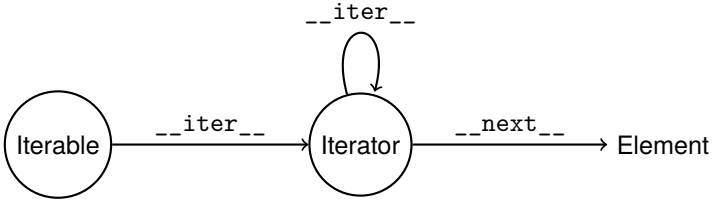
```
>>> for el in {1, 5, 3, 0}: print(el, end=' ')
...
0 1 3 5
```

- Dies alles sind Beispiele für iterierbare Objekte (Generalisierung von Generatoren).
- Das Verhalten dieser Objekte wird durch das Iterator-Protokoll bestimmt.

Das Iterator-Protokoll (1)

- Das Iterator-Protokoll unterscheidet zwei Arten von Objekten: iterierbare Objekte (Typ `Iterable[X]`) und Iteratoren (Typ `Iterator[X]`).
- Ein iterierbares Objekt implementiert die dunder Methode `__iter__`, die dann ein Iterator-Objekt zurückliefert.
- Ein Iterator-Objekt implementiert die dunder Methoden
  - `__iter__`, die dann immer `self` liefert, und
  - `__next__`, die das nächste Element liefert. Gibt es kein weiteres Element, so löst die Methode die Ausnahme `StopIteration` aus.
- Die Funktion `iter(`*object*`)` ruft *object*`.__iter__()` auf.
- Die Funktion `next(`*object*`)` ruft *object*`.__next__()` auf.

Das Iterator-Protokoll (2)



- Ein iterierbares Objekt (Iterable) erzeugt bei jedem Aufruf von `__iter__` einen neuen Iterator für eine Menge von Objekten.
- Ein Iterator liefert sich selbst beim Aufruf von `__iter__`; jeder Aufruf von `__next__` liefert ein neues Objekt aus der Menge.
- Da jeder Iterator die `__iter__`-Methode besitzen, können Iteratoren auch dort verwendet werden, wo ein iterierbares Objekt erwartet wird (z.B. `for`-Schleife).

Implementierung der `for`-Schleife

for

```
for el in seq:
    do_something(el)
```

wird intern wie die folgende `while`-Schleife ausgeführt

iterator

```
seq_iter = iter(seq)
try:
    while True:
        el = next(seq_iter)
        do_something(el)
except StopIteration:
    pass
```

Das Iterator-Protokoll bei der Arbeit

```
>>> seq = ['Crackpot', 'Religion']
>>> seq_iter = iter(seq)
>>> seq_iter
<list_iterator object at 0x110d24ca0>
>>> print(next(seq_iter))
Crackpot
>>> print(next(seq_iter))
Religion
>>> print(next(seq_iter))
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
StopIteration
```

Iterierbare Objekte vs. Iteratoren (1)

Ein Iterator ist nach einem Durchlauf, der mit `StopIteration` abgeschlossen wurde, erschöpft, wie in diesem Beispiel:

Python-Interpreter

```
>>> iterator = myMap(twox1, range(2))
>>> for x in iterator:
...     for y in iterator:
...         print(x,y)
...
1 3
>>>
```

Iterierbare Objekte vs. Iteratoren (2)

Alternativ: erzeuge bei jedem Start eines Schleifendurchlaufs einen neuen Iterator.

Python-Interpreter

```
>>> for x in myMap(twox1, range(2)):
...     for y in myMap(twox1, range(2)):
...         print(x,y)
...
1 1
1 3
3 1
3 3
>>>
```

Weitere iterierbare Objekte

- Die range-Funktion liefert ein range-Objekt, das iterierbar ist.
- D.h. das Objekt liefert bei jedem Aufruf von `iter()` einen neuen Iterator.

```
>>> range_obj = range(10)
>>> range_obj
range(0, 10)
>>> range_iter = iter(range_obj)
>>> range_iter
<range_iterator object at 0x110d51d40>
>>> list(range_iter)
[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]
>>> list(range_iter)
[]
>>> list(range_obj)
[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]
```

Direkte Verwendung des Iterator-Protokolls: myZip

Erinnerung:

```
>>> zz = zip(range(20), range(0,20,3)); zz
<zip object at 0x110d1e600>
>>> list(zz)
[(0, 0), (1, 3), (2, 6), (3, 9), (4, 12), (5, 15), (6, 18)]
```

- Für die Implementierung von `zip` muss explizit das Iterator-Protokoll verwendet werden, da zwei Eingaben unabhängig voneinander iteriert werden müssen.
- Eine Implementierung als Generator mit einer `for`-Schleife ist daher nicht möglich!

Implementierung: myZip

```
def myZip[A,B](s1: Iterable[A], s2: Iterable[B]) -> Iterator[tuple[A,B]]:
    i1 = iter(s1)
    i2 = iter(s2)
    try:
        while True:
            e1 = next(i1)
            e2 = next(i2)
            yield (e1, e2)
    except StopIteration:
        pass
```

Beispiel: Fibonacci-Iterator

fibiter.py

```
@dataclass
class FibIterator:
    maxn : int = 0

    def __post_init__(self):
        self.n, self.a, self.b = 0, 0, 1

    def __iter__(self):
        return self              # an iterator object!

    def __next__(self):
        self.n += 1
        self.a, self.b = self.b, self.a + self.b
        if not self.maxn or self.n <= self.maxn:
            return self.a
        else:
            raise StopIteration
```

FibIterator bei der Arbeit

Python-Interpreter

```
>>> f = FibIterator(10)
>>> list(f)
[1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55]
>>> list(f)
[]
>>> for i in FibIterator(): print(i)
...
1
1
2
3
5
...
```

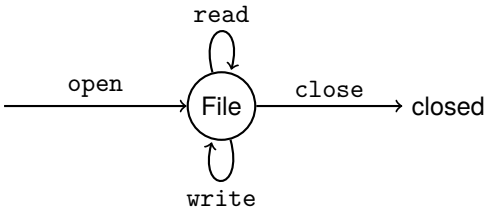
Iteratoren – selbst gestrickt

Iteratoren bieten:

1. eine einheitliche Schnittstelle zum Aufzählen von Elementen;
   ohne dabei eine Liste o.ä. aufbauen zu müssen (Speicher-schonend!);
2. weniger Beschränkungen als Generatoren;
3. die Möglichkeit, unendliche Mengen zu durchlaufen (natürlich nur endliche Anfangsstücke!).

4 Dateien

Dateien bearbeiten



- **`open`**`(filename : str, mode = 'r': str) -> file:`
  Öffnet die Datei mit dem Namen `filename` und liefert ein `file`-Objekt zurück.
- `mode` bestimmt, ob die Datei gelesen oder geschrieben werden soll (oder beides):
  - `"r"`: Lesen von Textdateien mit **`file.read()`**
  - `"w"`: Schreiben von Textdateien mit **`file.write()`**
  - `"r+"`: Schreiben und Lesen von Textdateien

Muster: Dateien mit Iterator und Kontextmanager lesen


```
with open (filename) as f:
    # initialize
    for line in f:
        pass
        # process this line
```

- Die Anweisung `with` *resource* `as` *name*: startet einen Kontextmanager
- Der Ausdruck *resource* initialisiert eine Ressource. Sie ist im zugehörigen Block als *name* verfügbar.
- Falls Ausnahmen im zugehörigen Block auftreten, wird die `resource` korrekt finalisiert. D.h. es ist kein extra `try`-Block erforderlich.
- Für Dateien heisst das, dass sie geschlossen werden, egal wie der `with`-Block verlassen wird.

Beispiel: fgrep

Das Unix-Kommando `fgrep` durchsucht Dateien nach einem festen String.

```
def fgrep (subject:str, filename:str):
    with open (filename) as f:
        for line in f:
            if subject in line:
                print(line)

fgrep ("joke", "text/killing_joke_sketch.txt")
```

Beispiel: fgrep mit Ausgabe

```
def fgrep2 (subject:str, infile:str, outfile:str):
    with open (infile) as fin, open (outfile, 'w') as fout:
        for line in fin:
            if subject in line:
                print(line, file=fout)
```

- Hier schützt der Kontextmanager zwei Ressourcen, die Eingabedatei und die Ausgabedatei.
- Zum Schreiben in eine Datei wird `print` mit dem Keyword-Argument `file` verwendet.

5 Zugabe: Sudoku

Sudoku

			9			7	2	8
2	7	8			3		1	
	9					6	4	
	5			6		2		
		6				3		
	1			5				
1			7		6		3	4
			5		4			
7		9	1			8		5

Sudoku-Regeln

1. Eine Gruppe von Zellen ist entweder
   - eine Zeile,
   - eine Spalte oder
   - ein fett umrahmter 3x3 Block.
2. Jede Gruppe muss die Ziffern 1-9 genau einmal enthalten.
3. Fülle die leeren Zellen, sodass (2) erfüllt ist!

Ein ähnlich schweres Problem wie das Rucksackproblem

Suchraum

- Der Suchraum hat in den meisten Fällen (17 Vorgaben) eine Größe von ca. 10^{61} möglichen Kombinationen.
- Würden wir eine Milliarde (10^9) Kombinationen pro Sekunde testen können, wäre die benötigte Rechenzeit $10^{61}/(10^9 \cdot 3 \cdot 10^7) \approx 3 \cdot 10^{44}$ Jahre.
- Die Lebensdauer des Weltalls wird mit 10^{11} Jahren angenommen.
- Selbst bei einer Beschleunigung um den Faktor 10^{30} würde die Rechnung nicht innerhalb der Lebensdauer des Weltalls abgeschlossen werden können.
- Trotzdem scheint das Lösen von Sudokus ja nicht so schwierig zu sein ...

Sudoku mit Backtracking lösen

- Repräsentiere das Spielfeld durch ein Dictionary
  `type Board = dict[Pos,set[int]]` mit
  `type Pos = tuple[int,int]`.
- Das Dictionary `b : Board` bildet das Paar `(row, col)` auf die Menge der möglichen Werte an Zeile `row` und Spalte `col` ab.
  - Dabei ist `row`, `col` $\in \{1,\ldots,9\}$.
  - Wir verwenden die Invariante $\emptyset \subset$ `b[(row,col)]` $\subseteq \{1,\ldots,9\}$.

Einlesen des initialen Spielfelds

- Wir möchten das initiale Spielfeld von einer Datei einlesen.
  - Wenn ein Feld mit `k` vorbesetzt ist, dann gilt `b[(row,col)] = {k}`.
  - Wenn ein Feld frei ist, dann gilt `b[(row,col)] = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}`.
- Beispiel (leere Felder durch −, entnommen Wikipedia):

```
53--7----
6--195---
-98----6-
8---6---3
4--8-3--1
7---2---6
-6----28-
---419--5
----8--79
```

Einlesen/Ausdrucken des Spielfelds

```
def read_board_from_file(filename : str) -> Board:
    with open (filename, 'r') as bfile:
        board = dict()
        empty = set(range(1,10))
        row = 1
        for line in bfile:
            for col, x in zip(range(1,10), line):
                board[ (row, col) ] = {int(x)} if x in "123456789" else empty.copy()
            row += 1
        return board
```

```
def print_board(board : Board):
    for row in range(1,10):
        line = ""
        for col in range(1,10):
            line += print_single(board[(row, col)])
        print (line)
```

Suche mit Backtracking

- Durchlaufe systematisch die Zeilen/Spalten-Paare von `(1,1)` bis `(9,9)`.
- Betrachte die Zelle `candidates = b[(row,col)]`. Wir können voraussetzen, dass diese Zelle nicht leer ist! (Warum?)
- Für jeden möglichen Kandidaten `c in candidates`:
  - Setze die Zelle auf `c`.
    - Entferne `c` aus den anderen Zellen in der gleichen Zeile.
    - Entferne `c` aus den anderen Zellen in der gleichen Spalte.
    - Entferne `c` aus den anderen Zellen im gleichen Block.
  - Wenn dabei eine Zelle leer wird, verwerfen wir den Kandidaten `c`.
  - Wenn dabei keine Zelle leer wird, dann betrachten wir rekursiv die nächste Zelle.
  - Danach stellen wir den Zustand vor Betrachtung von `c` wieder her (Backtracking) und betrachten den nächsten Kandidaten.
- Wenn wir die letzte Zelle erfolgreich bearbeiten konnten, haben wir eine Lösung!

Entferne c aus der Zeile

Gesucht wird

```
propagate_row(b : Board, p : Pos, c : int) -> bool
```

- Annahme: `c` wurde schon in `b[p]` eingetragen.
- Entferne `c` aus allen weiteren Zellen der gleichen Zeile!
- Liefere `False`, falls dabei eine Zelle leer wird.
- Ansonsten liefere `True`.

Kopieren des Boards

Gesucht wird

```
copy_board (b : Board) -> Board
```

- Es muss eine vollständige Kopie angefertigt werden, weil `b` noch für das Backtracking benötigt wird!
  - Ein neues Dictionary
  - Eine frische Kopie von jeder Menge

Naive Suche mit Backtracking

```
def try_from(b : Board, p : Optional[Pos] = None):
    p = next_pos(p)
    if p is None:
        print_board(b)
        return
    candidates = b[ p ]
    for c in candidates:
        next_b = copy_board(b)
        next_b[ p ] = { c }
        if (propagate_row(next_b, p, c) and
            propagate_col(next_b, p, c) and
            propagate_blk(next_b, p, c)):
            try_from(next_b, p)
```

6 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Ausnahmen sind in Python allgegenwärtig.
  - Sie können mit `raise` ausgelöst werden.
  - Sie können mit `try`, `except`, `else` und `finally` abgefangen und behandelt werden.
- Generatoren sehen aus wie Funktionen, geben ihre Werte aber mit `yield` zurück.
- Ein Generatoraufruf liefert einen Iterator, der beim Aufruf von `next()` bis zum nächsten `yield` läuft.
- Generatoren sind besonders nützlich zur Lösung von Suchproblemen mit Backtracking.
- Iteratoren besitzen die Methoden `__iter__` und `__next__`.
- Durch Aufrufen der `__next__`-Methode werden alle Elemente aufgezählt.
- Iterierbare Objekte besitzen eine Methode `__iter__`, die einen Iterator für die enthaltenen Objekte erzeugt.
- Dateien erlauben es, externe Inhalte zu lesen und zu schreiben.
- Am einfachsten mit dem Kontextmanager `with`/`as`.