

# Property-Based Testing mit Java

## Workshop

Bitte kclone dieses Git-Repository:

<https://github.com/jlink/pbt-workshop>



**Martin Klose**

@martinklose

klosebrothers.de

Softwerker

# Softwerker

Mitgründer der **Software Craftsmanship** Community **Berlin** (@swkberlin); unzählige Workshops im Zeichen von Testing, Codequalität und Agilität durchgeführt.

Sauberer und getesteter Code lässt mich **nachts besser schlafen.**

**@johanneslink**

johanneslink.net

Softwaretherapeut

# Softwaretherapeut

"In Deutschland ist die Bezeichnung Therapeut allein oder ergänzt mit bestimmten Begriffen gesetzlich nicht geschützt und daher **kein Hinweis auf** ein erfolgreich abgeschlossenes Studium oder auch nur **fachliche Kompetenz.**" Quelle: Wikipedia

# Beispiel-basierte Tests

Ein *Beispiel* zeigt, dass unser Code bei ganz konkreten Eingangswerten ein ganz konkretes Ergebnis liefert.



# Beispiel-basierte Tests

Ein *Beispiel* zeigt, dass unser Code bei ganz konkreten Eingangswerten ein ganz konkretes Ergebnis liefert.

```
@Test
void reverseList() {
    List<Integer> aList = Arrays.asList(1, 2, 3);
    Collections.reverse(aList);
    assertThat(aList).containsExactly(3, 2, 1);
}
```

Funktioniert *reverse()* nur für die getesteten Beispiele?

Wie **repräsentativ** sind unsere Tests?

# Wie viele Beispiele benötigen wir, um dem Code zu vertrauen?

```
@Example void emptyList() {
    List<Integer> aList = Collections.emptyList();
    assertThat(Collections.reverse(aList)).isEmpty();
}

@example void oneElement() {
    List<Integer> aList = Collections.singletonList(1);
    assertThat(Collections.reverse(aList)).containsExactly(1);
}

@example void manyElements() {
    List<Integer> aList = asList(1, 2, 3, 4, 5, 6);
    assertThat(Collections.reverse(aList)).containsExactly(6, 5, 4, 3, 2, 1);
}

@example void duplicateElements() {
    List<Integer> aList = asList(1, 2, 2, 4, 6, 6);
    assertThat(Collections.reverse(aList)).containsExactly(6, 6, 4, 2, 2, 1);
}
```

# Properties

Eine *Property* zeigt, dass unser Code **für eine Klasse** von Eingangswerten (Vorbedingung) bestimmte **allgemeine Eigenschaften** (Invariante) erfüllt.

# Properties

Eine *Property* zeigt, dass unser Code **für eine Klasse** von Eingangswerten (Vorbedingung) bestimmte **allgemeine Eigenschaften** (Invariante) erfüllt.

```
@Property  
void reverseList() {  
    // Vorbedingung?  
    // Invariante?  
}
```

**@Property**

```
void reverseList() {  
    // Vorbedingung?  
    // Invariante?  
}
```

**@Property**

```
void reverseList() {  
    // Vorbedingung?  
    // Invariante?  
}
```

## Vorbedingungen

- ▶ Beliebige Liste
- ▶ Nicht null

## @Property

```
void reverseList() {  
    // Vorbedingung?  
    // Invariante?  
}
```

## Vorbedingungen

- ▶ Beliebige Liste
- ▶ Nicht null

## Invarianten

- ▶ Länge der Liste bleibt gleich
- ▶ Alle Elemente bleiben erhalten
- ▶ Nach reverse ist das erste Element das letzte
- ▶ 2 x reverse erzeugt wieder das Original



# Eine Property als Java Code

```
boolean theSizeRemainsTheSame(List<Integer> original) {  
    List<Integer> reversed = reverse(original);  
    return original.size() == reversed.size();  
}
```

```
private <T> List<T> reverse(List<T> original) {  
    List<T> clone = new ArrayList<>(original);  
    Collections.reverse(clone);  
    return clone;  
}
```

# Jqwik

## @Property

```
boolean theSizeRemainsTheSame(@ForAll List<Integer> original) {  
    List<Integer> reversed = reverse(original);  
    return original.size() == reversed.size();  
}
```



```
@Property
```

```
boolean sizeRemainsTheSame(@ForAll List<Integer> original) {  
    List<Integer> reversed = reverse(original);  
    return original.size() == reversed.size();  
}
```

```
@Property
```

```
boolean sizeRemainsTheSame(@ForAll List<Integer> original) {  
    List<Integer> reversed = reverse(original);  
    return original.size() == reversed.size();  
}
```

```
@Property
```

```
void allElementsStay(@ForAll List<Integer> original) {  
    List<Integer> reversed = reverse(original);  
    Assertions.assertThat(original).allMatch(  
        element -> reversed.contains(element)  
    );  
}
```

@Property

```
boolean reverseMakesFirstElementLast(@ForAll List<Integer> original) {  
    Assume.that(original.size() >= 1);  
    Integer lastReversed = reverse(original).get(original.size() - 1);  
    return original.get(0).equals(lastReversed);  
}
```

```
@Property
```

```
boolean reverseMakesFirstElementLast(@ForAll List<Integer> original) {  
    Assume.that(original.size() >= 1);  
    Integer lastReversed = reverse(original).get(original.size() - 1);  
    return original.get(0).equals(lastReversed);  
}
```

```
@Property
```

```
boolean reverseTwiceIsOriginal(@ForAll List<Integer> original) {  
    return reverse(reverse(original)).equals(original);  
}
```

@Property

```
boolean reverseMakesFirstElementLast(@ForAll List<Integer> original) {  
    Assume.that(original.size() >= 1);  
    Integer lastReversed = reverse(original).get(original.size() - 1);  
    return original.get(0).equals(lastReversed);  
}
```

@Property

```
boolean reverseTwiceIsOriginal(@ForAll List<Integer> original) {  
    return reverse(reverse(original)).equals(original);  
}
```

prop\_reversed :: [Int] -> Bool

prop\_reversed xs =

reverse (reverse xs) == xs

**Haskell!**



# Demo

- `pbt.reverse.ReverseListTests`
- `pbt.reverse.ReverseListProperties`
- `pbt.examples.Demo1`
- Einbindung in Gradle und IntelliJ

# Was ist jqwik?

<https://jqwik.net>

- Eine **Test-Engine** für die JUnit5–Plattform
- Ein Generator für Testfälle mit
  - ▶ **zufälligen und typischen** Eingangswerten
  - ▶ und **Kombinationen** von Eingangswerten
  - ▶ bisweilen **vollständige Generierung** aller Kombinationen
- Aktuelle Version: **1.1.3**

# Was ist jqwik **nicht**?

- Es ist **kein vollständig randomisiertes** Testwerkzeug, das man ohne Nachdenken auf sein Programm loslässt.
- Es ist kein Silver Bullet für alle Testprobleme
- Properties werden nicht bewiesen, sondern widerlegt (aka **falsifiziert**)

# Vorbereitung

## 1. Klone das Repo:

```
git clone https://github.com/jlink/pbt-workshop
```

## 2. Importiere das Repo in deine IDE

**Intelli J:** New → Project from Existing Sources... : build.gradle

**Eclipse:** Import → Gradle → Existing Gradle Project

## 3. Starte alle Tests im Package **pbt.examples.reverse** "10 of 10 tests passed"

# Vorbereitung

## 1. Klone das Repo:

```
git clone https://github.com/jlink/pbt-workshop
```

## 2. Importiere das Repo in deine IDE

**Intelli J:** New → Project from Existing Sources... : build.gradle

**Eclipse:** Import → Gradle → Existing Gradle Project

## 3. Starte alle Tests im Package **pbt.examples.reverse** "10 of 10 tests passed"

jqwik's user guide:

<https://jqwik.net/user-guide.html>

# Übung 1:

## `Collections.sort(List aList)`

1. Sammelt alle Properties mit Preconditions, Postconditions und Invarianten
2. Implementiert die Properties in Klasse `pbt.exercise1.SortingProperties`

# Übung 1:

## `Collections.sort(List aList)`

1. **Brainstorming: Properties mit Preconditions, Postconditions und Invarianten**
2. Implementiert die Properties in Klasse `pbt.ex1.SortingProperties`

# Properties von `Collections.sort(List aList)`



# Properties von `Collections.sort(List aList)`

- Zahl der Elemente bleibt gleich

# Properties von `Collections.sort(List aList)`

- Zahl der Elemente bleibt gleich
- Alle Elemente bleiben erhalten

# Properties von `Collections.sort(List aList)`

- Zahl der Elemente bleibt gleich
- Alle Elemente bleiben erhalten
- Es kommen keine neuen Elemente hinzu

# Properties von `Collections.sort(List aList)`

- Zahl der Elemente bleibt gleich
- Alle Elemente bleiben erhalten
- Es kommen keine neuen Elemente hinzu
- Mehrmaliges Sortieren verändert das Ergebnis nicht

# Properties von `Collections.sort(List aList)`

- Zahl der Elemente bleibt gleich
- Alle Elemente bleiben erhalten
- Es kommen keine neuen Elemente hinzu
- Mehrmaliges Sortieren verändert das Ergebnis nicht
- Überprüfe „Sortiertheit“ durch **Vollständige Induktion**:
  1. If list size  $< 2 \rightarrow$  true
  2. If first element  $\leq$  second element  
then  $\rightarrow$  check tail of list  
else  $\rightarrow$  false

# Übung 1:

## `Collections.sort(List aList)`

1. Brainstorming: Properties mit Preconditions, Postconditions und Invarianten
2. Implementiert die Properties in Klasse `pbt.ex1.SortingProperties`

```
@Property
```

```
void squareOfRootIsOriginalValue(@ForAll double aNumber) {  
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);  
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));  
}
```

@Property

```
void squareOfRootIsOriginalValue(@ForAll double aNumber) {  
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);  
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));  
}
```

**java.lang.AssertionError:**

**Expecting:**

**<NaN>**

**to be close to:**

**<-1.0>**

**by less than 1% but difference was NaN%.**

**(a difference of exactly 1% being considered valid)**



# Beschränkung generierter Werte

- Häufig gilt eine Property nur für eine **beschränkte Untermenge** eines gegebenen Typs

```
@Property
void squareOfRootIsOriginalValue(
    @ForAll @DoubleRange(min=0, max=Double.MAX_VALUE) double aNumber
) {
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));
}
```

```
timestamp = 2017-10-20T17:23:53.351,
tries = 1000,
checks = 1000,
seed = 7890962728489990406
```

```
@Property
void squareOfRootIsOriginalValue(
    @ForAll @Positive double aNumber
) {
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));
}
```

```
timestamp = 2017-10-20T17:23:53.351,
tries = 1000,
checks = 1000,
seed = 7890962728489990406
```

```
@Property
void squareOfRootIsOriginalValue(
    @ForAll("positiveDoubles") double aNumber
) {
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Double> positiveDoubles() {
    return Arbitraries.doubles().between(0, Double.MAX_VALUE);
}
```

```
timestamp = 2017-10-20T17:23:53.351,
tries = 1000,
checks = 1000,
seed = 7890962728489990406
```

# Factory of ~~Factories~~ Generators

```
public interface Arbitrary<T> {  
    RandomGenerator<T> generator(int tries);  
  
    default Arbitrary<T> filter(final Predicate<T> filterPredicate) { ... }  
    default <U> Arbitrary<U> map(final Function<T, U> mapper) { ... }  
    ...  
}
```

# Factory of ~~Factories~~ Generators

```
public interface Arbitrary<T> {  
    RandomGenerator<T> generator(int tries);  
  
    default Arbitrary<T> filter(final Predicate<T> filterPredicate) { ... }  
    default <U> Arbitrary<U> map(final Function<T, U> mapper) { ... }  
    ...  
}
```

```
public interface RandomGenerator<T> {  
    Shrinkable<T> next(Random random);  
}
```

```
@Property
```

```
void squareOfRootIsOriginalValue(@ForAll double aNumber) {
```

```
    Assume.that(aNumber > 0);
```

```
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);
```

```
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));
```

```
}
```

```
@Property
```

```
void squareOfRootIsOriginalValue(@ForAll double aNumber) {  
    Assume.that(aNumber > 0);  
  
    double sqrt = Math.sqrt(aNumber);  
    Assertions.assertThat(sqrt * sqrt).isCloseTo(aNumber, withPercentage(1));  
}
```

```
timestamp = 2017-10-20T17:34:27.857,
```

```
    tries = 1000,
```

```
    checks = 489,
```

```
    seed = -1808546598028468149
```



Werte generieren

# Werte generieren

**Arbitraries** sind der Anfang von allem...

# Werte generieren

**Arbitraries** sind der Anfang von allem...

```
Arbitraries
  .strings()
  .integers()
  .floats()
  ...
  .of(...) // values, enums
  .frequency(...) // add weights
  .constant(...)
  .oneOf(...)
  ...
```

# Generatoren Konfigurieren

Fluent Interfaces

# Generatoren Konfigurieren

Fluent Interfaces

**Arbitraries** können konfiguriert werden

# Generatoren Konfigurieren

## Fluent Interfaces

**Arbitraries** können konfiguriert werden

```
@Provide
StringArbitrary fluentString() {
    return Arbitraries.strings()
        .alpha()
        .numeric()
        .withChars('?', '!', '.')
        .ofMinLength(2)
        .ofMaxLength(10);
}
```

# Generierte Werte verändern

- Manchmal möchte man generierte Werte **filtern**
- Manchmal möchte man generierte Werte **abbilden**
- Manchmal möchte man generierte Werte miteinander **kombinieren**

# Werte filtern

```
@Property
boolean evenNumbersAreEven(@ForAll("evenUpTo10000") int anInt) {
    return anInt % 2 == 0;
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Integer> evenUpTo10000() {
    return Arbitraries.integers()
        .between(0, 10000)
        .filter(i -> i % 2 == 0);
}
```



# Werte abbilden

```
@Provide
Arbitrary<Integer> evenUpTo10000() {
    return Arbitraries.integers()
        .between(0, 5000)
        .map(i -> i * 2);
}
```

# Werte abbilden

```
@Provide
Arbitrary<Integer> evenUpTo10000() {
    return Arbitraries.integers()
        .between(0, 5000)
        .map(i -> i * 2);
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Integer> evenUpTo10000() {
    return Arbitraries.integers()
        .between(0, 10000)
        .filter(i -> i % 2 == 0);
}
```

# Werte kombinieren

```
public class Person {  
    public Person(String firstName, String lastName) {...}  
    public String fullName() {return firstName + " " + lastName;}  
}
```

# Werte kombinieren

```
public class Person {  
    public Person(String firstName, String lastName) {...}  
    public String fullName() {return firstName + " " + lastName;}  
}
```

## @Provide

```
Arbitrary<Person> validPerson() {  
    Arbitrary<Character> initialChar = Arbitraries.chars().between('A', 'Z');  
    Arbitrary<String> firstName = Arbitraries.strings()... ;  
    Arbitrary<String> lastName = Arbitraries.strings()... ;  
    return Combinators.combine(initialChar, firstName, lastName)  
        .as((initial, first, last) -> new Person(initial + first, last));  
}
```

# FlatMapping

```
@Property
boolean allStringsHaveSameLength(
    @ForAll("equalSizedStrings") List<String> listOfStrings
) {
    int min = listOfStrings.stream().mapToInt(String::length).min().getAsInt();
    int max = listOfStrings.stream().mapToInt(String::length).max().getAsInt();
    return min == max;
}
```

```
@Provide
Arbitrary<List<String>> equalSizedStrings() {
    return Arbitraries.integers().between(1, 42)
        .flatMap(length ->
            Arbitraries.strings().alpha().ofLength(length)
                .list().ofMinSize(1).ofMaxSize(10));
}
```

# Demo

- `pbt.examples.FluentInterfaceExamples`
- `pbt.examples.MapAndFilterExamples`

# Übung 2: Generiere passende Werte

- **Sorgt dafür, dass die Property-Methoden mit den richtigen Werten gefüttert werden**
  - ▶ `ZipCodeProperties`:  
Deutsche Postleitzahlen (5 Stellen, 1 führende Null möglich)
  - ▶ `SubstringProperties`:  
Tuple von `(String, beginIndex, endIndex)`  
für `String.substring(..)`-Funktion
  - ▶ `AddressProperties`:  
Valide Instanzen der Klasse `Address`
- **Beachtet dabei:**
  - ▶ Keine Änderungen an den Assertions!
  - ▶ Möglichst große Variabilität in den Daten!

# Vollständige Generierung

```
@Property(generation = GenerationMode.EXHAUSTIVE)
void allChessSquares(
    @ForAll @CharRange(from = 'a', to = 'h') char column,
    @ForAll @CharRange(from = '1', to = '8') char row
) {
    String square = column + "" + row;
    System.out.println(square);
}
```



```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {  
    if (aList.size() < 4) {  
        aList = new ArrayList<>(aList);  
        reverse(aList);  
    }  
    return aList;  
}
```

```
@Property(shrinking = ShrinkingMode.OFF)  
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {  
    Assume.that(!aList.isEmpty());  
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);  
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);  
}
```

```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {  
    if (aList.size() < 4) {  
        aList = new ArrayList<>(aList);  
        reverse(aList);  
    }  
    return aList;  
}
```

```
@Property(shrinking = ShrinkingMode.OFF)  
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {  
    Assume.that(!aList.isEmpty());  
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);  
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);  
}
```

**org.opentest4j.AssertionFailedError:**

**Property [reverseShouldSwapFirstAndLast] falsified with sample**

**[[0, -2147483648, 2147483647, -7997, 7997, -3223, -6474, 1915, -7151,  
3102, 4362, 714, 3053, 1919, -445, 7498, -2424, 3016, -5127, -7401, -7946,  
-3801, -305]]**

```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {  
    if (aList.size() < 4) {  
        aList = new ArrayList<>(aList);  
        reverse(aList);  
    }  
    return aList;  
}
```

```
@Property(shrinking = ShrinkingMode.OFF)
```

```
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {  
    Assume.that(!aList.isEmpty());  
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);  
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);  
}
```

```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {  
    if (aList.size() < 4) {  
        aList = new ArrayList<>(aList);  
        reverse(aList);  
    }  
    return aList;  
}
```

```
@Property(shrinking = ShrinkingMode.OFF)  
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {  
    Assume.that(!aList.isEmpty());  
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);  
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);  
}
```

```
org.opentest4j.AssertionFailedError:  
Property [reverseShouldSwapFirstAndLast] falsified with sample  
[[0, 0, 0, -1]]
```

```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {
    if (aList.size() < 4) {
        aList = new ArrayList<>(aList);
        reverse(aList);
    }
    return aList;
}

@Property(shrinking = ShrinkingMode.OFF)
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {
    Assume.that(!aList.isEmpty());
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);
}
```

**org.opentest4j.AssertionFailedError:**  
**Property [reverseShouldSwapFirstAndLast] falsified with sample**  
**[[0, 0, 0, -1]]**

```
static <E> List<E> brokenReverse(List<E> aList) {  
    if (aList.size() < 4) {  
        aList = new ArrayList<>(aList);  
        reverse(aList);  
    }  
    return aList;  
}
```

@Property

```
boolean reverseShouldSwapFirstAndLast(@ForAll List<Integer> aList) {  
    Assume.that(!aList.isEmpty());  
    List<Integer> reversed = brokenReverse(aList);  
    return aList.get(0) == reversed.get(aList.size() - 1);  
}
```

**org.opentest4j.AssertionFailedError:**

**Property [reverseShouldSwapFirstAndLast] falsified with sample  
[[0, 0, 0, -1]]**

# The Importance of Being Shrunken

- "Schrumpfen" einer falsifizierten Property: Finde **das einfachste** Eingabe-Beispiel, das immer noch fehlschlägt.
- Manchmal gibt es das einfachste Beispiel nicht, oder die Suche danach würde sehr lange dauern.
- Benutze **Heuristiken** um Werte zu schrumpfen, z.B.
  - ▶ Versuche Zahlen-Werte näher bei Null
  - ▶ Verkleinere Listen, Mengen, Arrays

```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```

```
["abcd", "efgh", "ijkl"]
```



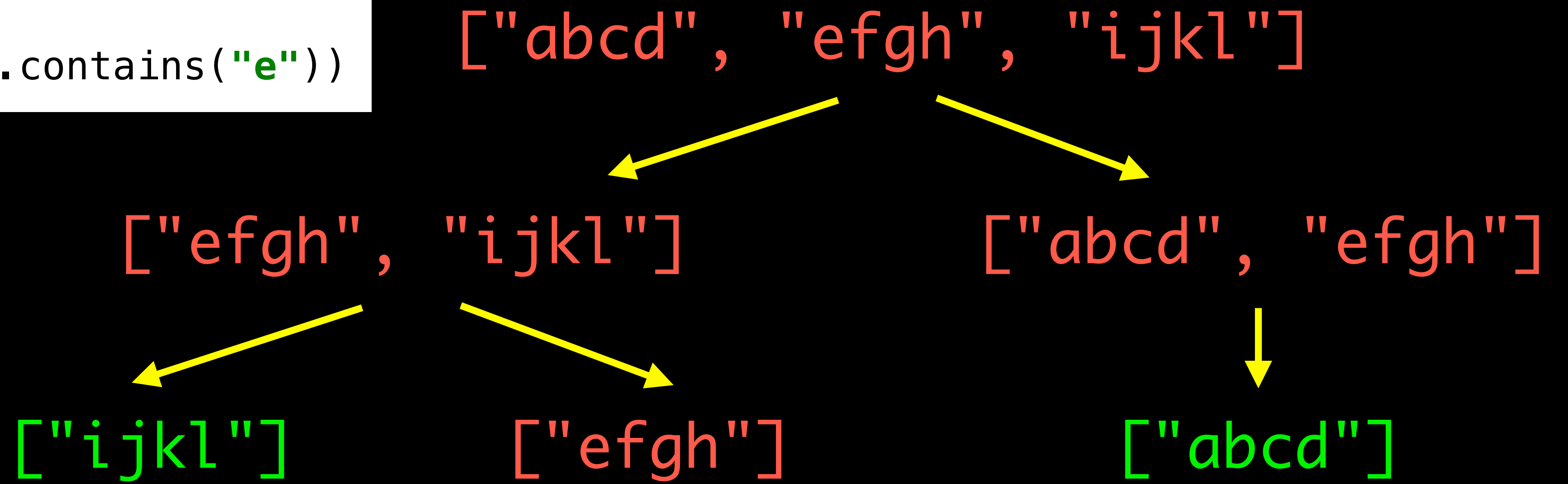
```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```

["abcd", "efgh", "ijkl"]

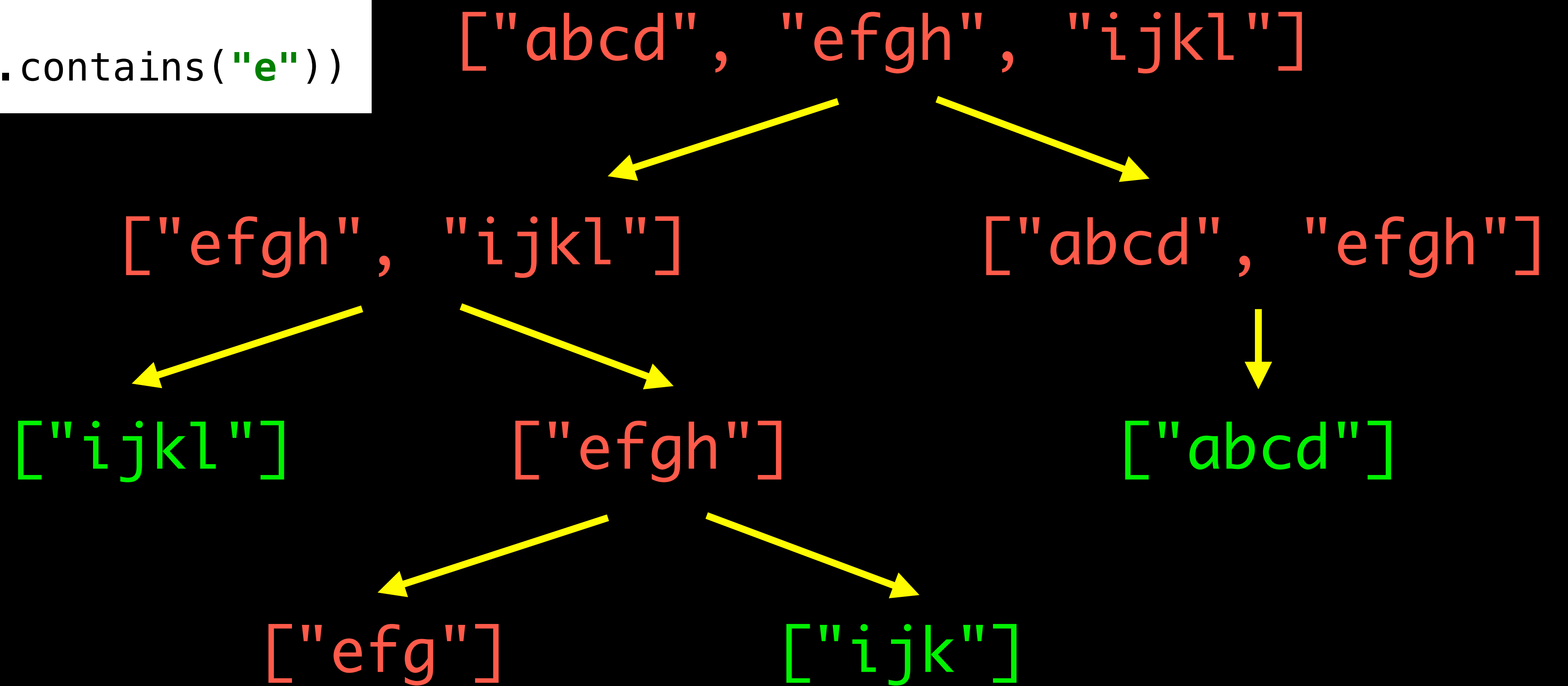
["efgh", "ijkl"]

["abcd", "efgh"]

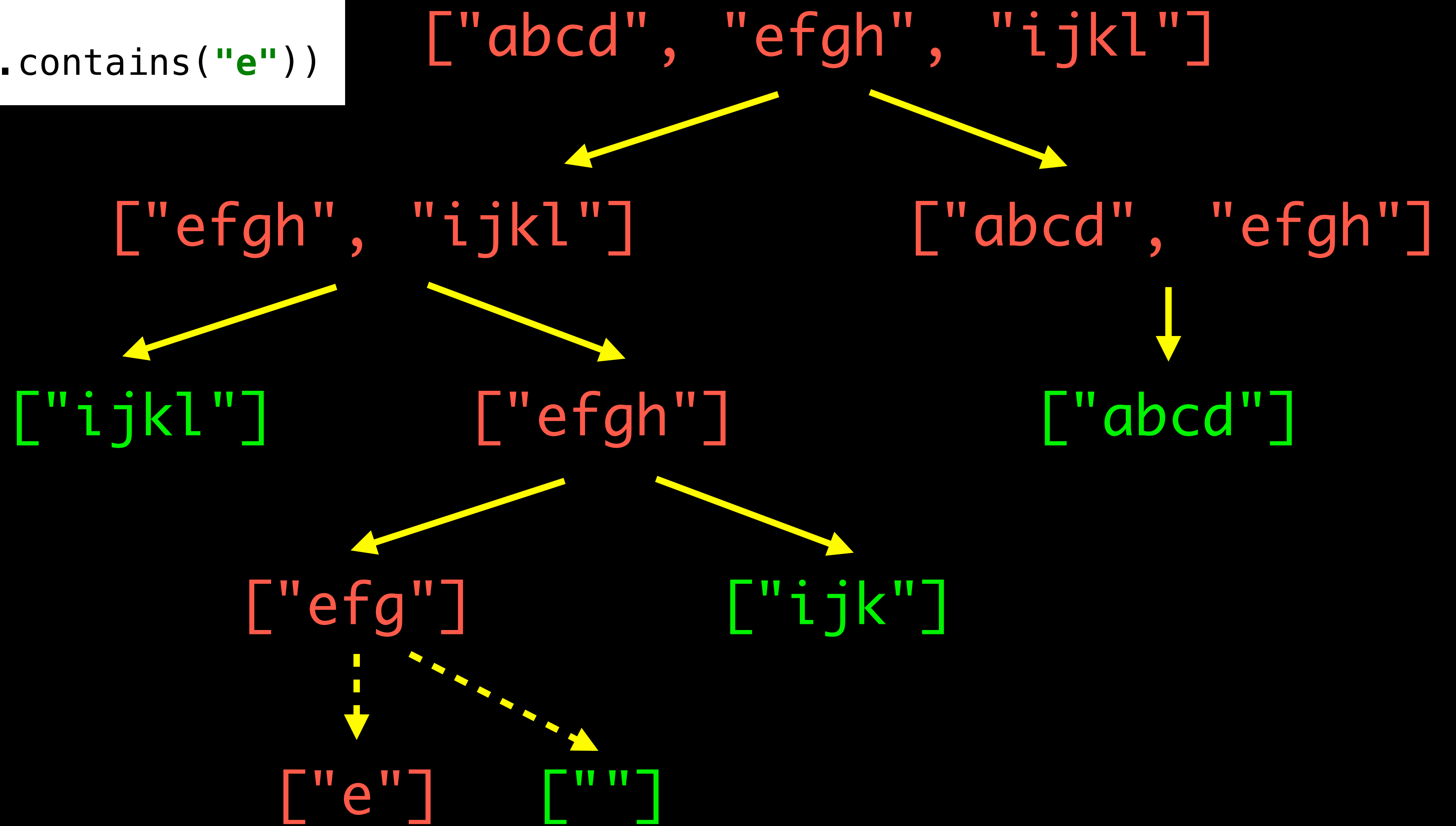
```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```



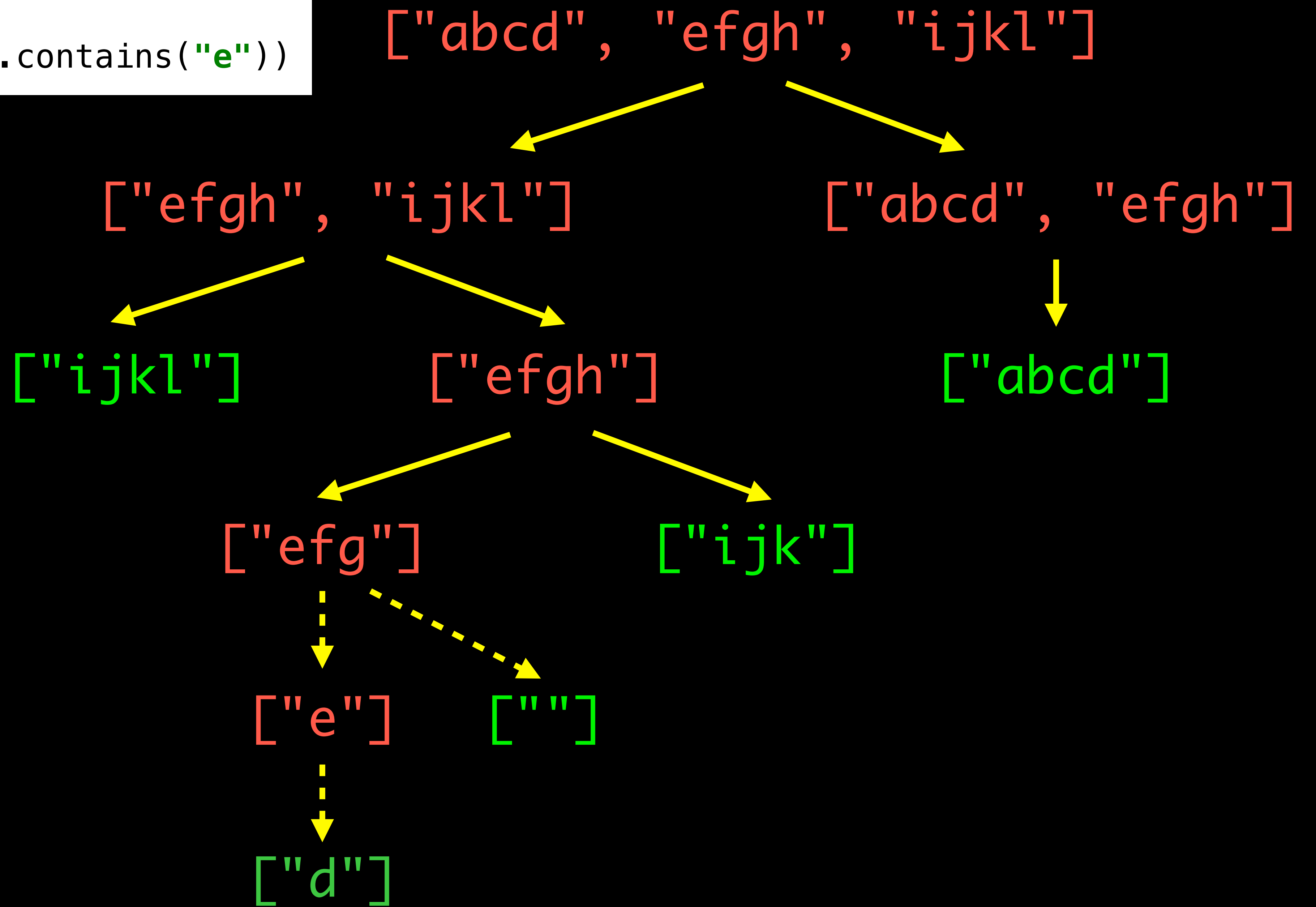
```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```



```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```



```
list.stream()  
  .noneMatch(s -> s.contains("e"))
```



# Type-based vs Integrated Shrinking

- Type-Based Shrinking: Nur der Typ von Werten dient als Constraint für die Schrumpfungversuche
  - ▶ Problem: Schrumpfen kann zu Ergebnissen führen, die eigentlich bei der Generierung ausgeschlossen wurden
- Integrated Shrinking: Alle Schritte und Bedingungen der Generierung werden beim Schrumpfen berücksichtigt
- **jqwik** implementiert **integriertes Schrumpfen**

```
@Property
boolean shrinkingCanBeComplicated(
    @ForAll("first") String first,
    @ForAll("second") String second
) {
    String aString = first + second;
    return aString.length() > 5 || aString.length() < 4;
}
```

```
@Provide
Arbitrary<String> first() {
    return Arbitraries.strings() //
        .withCharRange('a', 'z') //
        .ofMinLength(1).ofMaxLength(10) //
        .filter(string -> string.endsWith("h"));
}
```

```
@Provide
Arbitrary<String> second() {
    return Arbitraries.strings() //
        .withCharRange('0', '9') //
        .ofMinLength(0).ofMaxLength(10) //
        .filter(string -> string.length() >= 1);
}
```

# Prime Numbers Kata

## `pbt.primes.PrimesProperties`

- Implementiere property-getrieben die Funktion  
`List<Integer> Primes.factorize(int aNumber)`
- Schritt 1: Überlegt euch Properties
- Schritt 2: Implementiert Property für Property



Properties von  
`Primes.factorize(int aNumber)`

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- `f(prime) -> [prime]`

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- `f(prime) -> [prime]`
- `f(prime * prime) -> [prime, prime]`

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- `f(prime) -> [prime]`
- `f(prime * prime) -> [prime, prime]`
- `f(prime^n) -> ...`

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- `f(prime) -> [prime]`
- `f(prime * prime) -> [prime, prime]`
- `f(prime^n) -> ...`
- `f(prime1 * prime2) -> [prime1, prime2]`

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- $f(\text{prime}) \rightarrow [\text{prime}]$
- $f(\text{prime} * \text{prime}) \rightarrow [\text{prime}, \text{prime}]$
- $f(\text{prime}^n) \rightarrow \dots$
- $f(\text{prime1} * \text{prime2}) \rightarrow [\text{prime1}, \text{prime2}]$
- $f(\text{prime1} * \text{prime2} * \dots) \rightarrow \dots$

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- $f(\text{prime}) \rightarrow [\text{prime}]$
- $f(\text{prime} * \text{prime}) \rightarrow [\text{prime}, \text{prime}]$
- $f(\text{prime}^n) \rightarrow \dots$
- $f(\text{prime1} * \text{prime2}) \rightarrow [\text{prime1}, \text{prime2}]$
- $f(\text{prime1} * \text{prime2} * \dots) \rightarrow \dots$
- $[\text{prime1}, \text{prime2} \dots]$  ist aufsteigend sortiert

# Properties von `Primes.factorize(int aNumber)`

- $f(\text{prime}) \rightarrow [\text{prime}]$
- $f(\text{prime} * \text{prime}) \rightarrow [\text{prime}, \text{prime}]$
- $f(\text{prime}^n) \rightarrow \dots$
- $f(\text{prime}_1 * \text{prime}_2) \rightarrow [\text{prime}_1, \text{prime}_2]$
- $f(\text{prime}_1 * \text{prime}_2 * \dots) \rightarrow \dots$
- $[\text{prime}_1, \text{prime}_2 \dots]$  ist aufsteigend sortiert
- alle Zahlen im Ergebnis sind Primzahlen



# How to Generate Primes (1)

```
@Property
boolean primesCannotBeFactored(@ForAll("primes") int aPrime) {
    return factorize(aPrime).equals(Collections.singletonList(aPrime));
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Integer> primes() {
    return Arbitraries.of(2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19);
}
```

# How to Generate Primes (2)

```
@Property
boolean primesCannotBeFactored(@ForAll("primes") int aPrime) {
    return factorize(aPrime).equals(Collections.singletonList(aPrime));
}

@Provide
Arbitrary<Integer> primes() {
    return Arbitraries.randomValue(random -> generatePrime(random));
}

private Integer generatePrime(Random random) {
    int candidate;
    do {
        candidate = random.nextInt(10000) + 2;
    } while (!isPrime(candidate));
    return candidate;
}
```

# Patterns of PBT

- Obvious Property
- Fuzzying
- Inverse functions
- Idempotent functions
- Commutativity
- Black-box testing
- Induction
- Test oracle
- Invariant properties
- Stateful Testing

# Obvious Property

- Manchmal besteht die Spezifikation (zumindest teilweise) aus Properties
- Beispiel: Typische Business-Rule
  - ▶ *"Für alle Kunden mit einem jährlichen Geschäftsvolumen  $> X \text{ €}$  gilt ein zusätzlicher Rabatt von  $Y \%$ , wenn die Rechnungssumme  $Z \text{ €}$  übersteigt"*

# Fizz Buzz

- Zähle aufwärts von 1 bis 100
- "Normale" Zahlen werden normal gezählt
- Vielfache von 3 werden "Fizz" gezählt
- Vielfache von 5 werden "Buzz" gezählt
- Vielfache von 3 und 5 werden "FizzBuzz" gezählt

```
@Property
@Label("multiple of 3 contains 'Fizz'")
boolean multiple3ContainsFizz(@ForAll("multipleOf3") int anInt) {
    return fizzBuzz(anInt).contains("Fizz");
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Integer> multipleOf3() {
    return Arbitraries.integers().between(1, 33).map(i -> i * 3);
}
```

```
@Property
@Label("multiple of 3 contains 'Fizz'")
boolean multiple3ContainsFizz(@ForAll("multipleOf3") int anInt) {
    return fizzBuzz(anInt).contains("Fizz");
}
```

```
@Provide
Arbitrary<Integer> multipleOf3() {
    return Arbitraries.integers().between(1, 33).map(i -> i * 3);
}
```

## ▼ ✓ Test Results

- ▼ ✓ Calling fizzBuzz with...
  - ✓ multiple of 5 contains 'Buzz'
  - ✓ number that is not a multiple of 3 nor 5 returns the number itself
  - ✓ multiple of 3 contains 'Fizz'
  - ✓ a multiple of 3 and 5 returns 'FizzBuzz'

# Fuzzying:

## The Code Should not Explode

- Generiere alle denkbaren Arten von Inputs und teste, dass der Basis-Kontrakt einer Funktion immer erfüllt wird, z.B.:
  - ▶ keine Exceptions,
  - ▶ keine Nulls als Rückgabe
  - ▶ Rückgabe im erlaubten Wertebereich
  - ▶ Laufzeit unter einer bestimmten Grenze
- Besonders wertvoll bei Integrierten Tests



# Inverse Functions

- Funktion + inverse Funktion  
ergibt die ursprüngliche Eingabe
  - ▶ Encode / Decode

```
class InverseFunctions {  
    @Property  
    void encodeAndDecodeAreInverse(  
        @ForAll @StringLength(min = 1, max = 20) String toEncode,  
        @ForAll("charset") String charset  
    ) throws UnsupportedOperationException {  
        String encoded = URLEncoder.encode(toEncode, charset);  
        assertThat(URLEncoder.decode(encoded, charset)).isEqualTo(toEncode);  
    }  
    @Provide  
    Arbitrary<String> charset() {  
        Set<String> charsets = Charset.availableCharsets().keySet();  
        return Arbitraries.of(charsets.toArray(new String[charsets.size()]));  
    }  
}
```

```

class InverseFunctions {
    @Property
    void encodeAndDecodeAreInverse(
        @ForAll @StringLength(min = 1, max = 20) String toEncode,
        @ForAll("charset") String charset
    ) throws UnsupportedOperationException {
        String encoded = URLEncoder.encode(toEncode, charset);
        assertThat(URLEncoder.decode(encoded, charset)).isEqualTo(toEncode);
    }

    @Provide
    Arbitrary<String> charset() {
        Set<String> charsets = Charset.availableCharsets().keySet();
        return Arbitraries.of(charsets.toArray(new String[charsets.size()]));
    }
}

```

```

originalSample = ["L?齧", "IBM855"],
sample         = ["€", "Big5"]

```

```

java.lang.AssertionError:
Expecting:
  <"€">
to be equal to:
  <"?">
but was not.

```

# Idempotent Functions

- **Mehrfache Anwendung einer Funktion verändert nichts**
  - ▶ **Mehrfache Sortierung einer Liste**
  - ▶ **Duplikate aus Liste entfernen**

# Invariant Properties

Manche Dinge ändern sich nie...

- ▶ Die Größe einer Liste nach dem Mapping
- ▶ Der Inhalt einer Liste nach dem Sortieren

# Commutativity:

## Different paths, same destination

- Erst Sortieren, dann Filtern  
== Erst Filtern, dann Sortieren

```
class Commutativity {
    @Property
    void sortingAndFilteringAreCommutative(
        @ForAll List<@AlphaChars String> listOfNames
    ) {
        List<String> filteredThenSorted = listOfNames.stream()
            .filter(name -> !name.toLowerCase().contains("a"))
            .sorted()
            .collect(Collectors.toList());

        List<String> sortedThenFiltered = listOfNames.stream()
            .sorted()
            .filter(name -> !name.toLowerCase().contains("a"))
            .collect(Collectors.toList());

        Assertions.assertThat(filteredThenSorted).isEqualTo(sortedThenFiltered);
    }
}
```

## Test Oracle:

### Mit alternativer Implementierung verifizieren

- Einfach, aber nicht-performant
- Parallel versus Single-Threaded
- Selbst-gemacht versus kommerziell
- Alt (vor dem Refactoring) versus Neu
  - ▶ Variante des "Golden Master"



# Black-box Testing

Hard to compute, easy to verify

- ▶ Primzahlermittlung
- ▶ Pfad durch ein Labyrinth

# Induction:

## Solving a smaller problem first

- Eine Liste ist sortiert, wenn
  - ▶ Das erste Element kleiner als das zweite ist
  - ▶ Alles nach dem ersten Element auch sortiert ist

```
@Property
```

```
boolean sortingAListWorks(@ForAll List<Integer> unsorted) {  
    return isSorted(sort(unsorted));  
}
```

```
private boolean isSorted(List<Integer> sorted) {  
    if (sorted.size() <= 1) return true;  
    return sorted.get(0) <= sorted.get(1)  
        && isSorted(sorted.subList(1, sorted.size()));  
}
```

# Exercise 3:

## Ergänze Test-Suite mit Property-Tests

### CSV Line parsing specification:

- ▶ A line can be up to 1024 characters long
- ▶ A line can have any number of fields
- ▶ Fields are separated by separator char ,
- ▶ Field data can be quoted within " ".  
The separator char is not active within quoted fields.
- ▶ Character " can be escaped as "" within quoted fields.
- ▶ Valid characters for records include only:  
! "#\$%&'()\*+,-./0123456789:;<=>?@  
ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ  
[\]^\_`abcdefghijklmnopqrstuvwxyz{|}~

`CSVLineParsingProperties.ALLOWED_CHARACTERS`

## Exercise 3:

# Ergänze Test-Suite mit Property-Tests

**CSVLineParser** comes with test suite

1. Which example tests can be replaced by properties?
2. Which patterns do apply?
3. Can you think of other properties?
  - ▶ Note that a failing property can either
    - reveal a bug
    - reveal a hole in the specification

# Exercise 3: Debriefing

- Bugs
  - ▶ " direkt nach dem Quote
  - ▶ Leeres quoted field mit Nachfolger
- Löcher in der Spezifikation
  - ▶ Sollen umrahmende Leerzeichen getrimmt werden?
  - ▶ Wie soll mit nichtgeschlossenen Quotes umgegangen werden?
    - Welche Property würde dieses Problem offenbaren?
- Verwendete Patterns

# Stateful Testing

Bei einem zustandsbehafteten Objekt...

- Welche Aktionen sind möglich?
- Wie wird der Zustand verändert?
- Welche Invarianten gelten immer?

Lass den Computer **viele zufällig gewählte Aktionen** ausprobieren...

```
public class MyStringStack {  
    public void push(String element) {...}  
    public String pop() {...}  
    public void clear() {...}  
    public boolean isEmpty() {...}  
    public int size() {...}  
    public String top() {...}  
}
```



```
public interface Action<M> {  
    default boolean precondition(M model) {return true;}  
    M run(M model);  
}
```

```
public interface Action<M> {  
    default boolean precondition(M model) {return true;}  
    M run(M model);  
}
```

```
class PopAction implements Action<MyStringStack> {  
    @Override  
    public boolean precondition(MyStringStack model) {  
        return !model.isEmpty();  
    }  
    @Override  
    public MyStringStack run(MyStringStack model) {  
        int sizeBefore = model.size();  
        String topBefore = model.top();  
  
        String popped = model.pop();  
        Assertions.assertThat(popped).isEqualTo(topBefore);  
        Assertions.assertThat(model.size()).isEqualTo(sizeBefore - 1);  
        return model;  
    }  
}
```

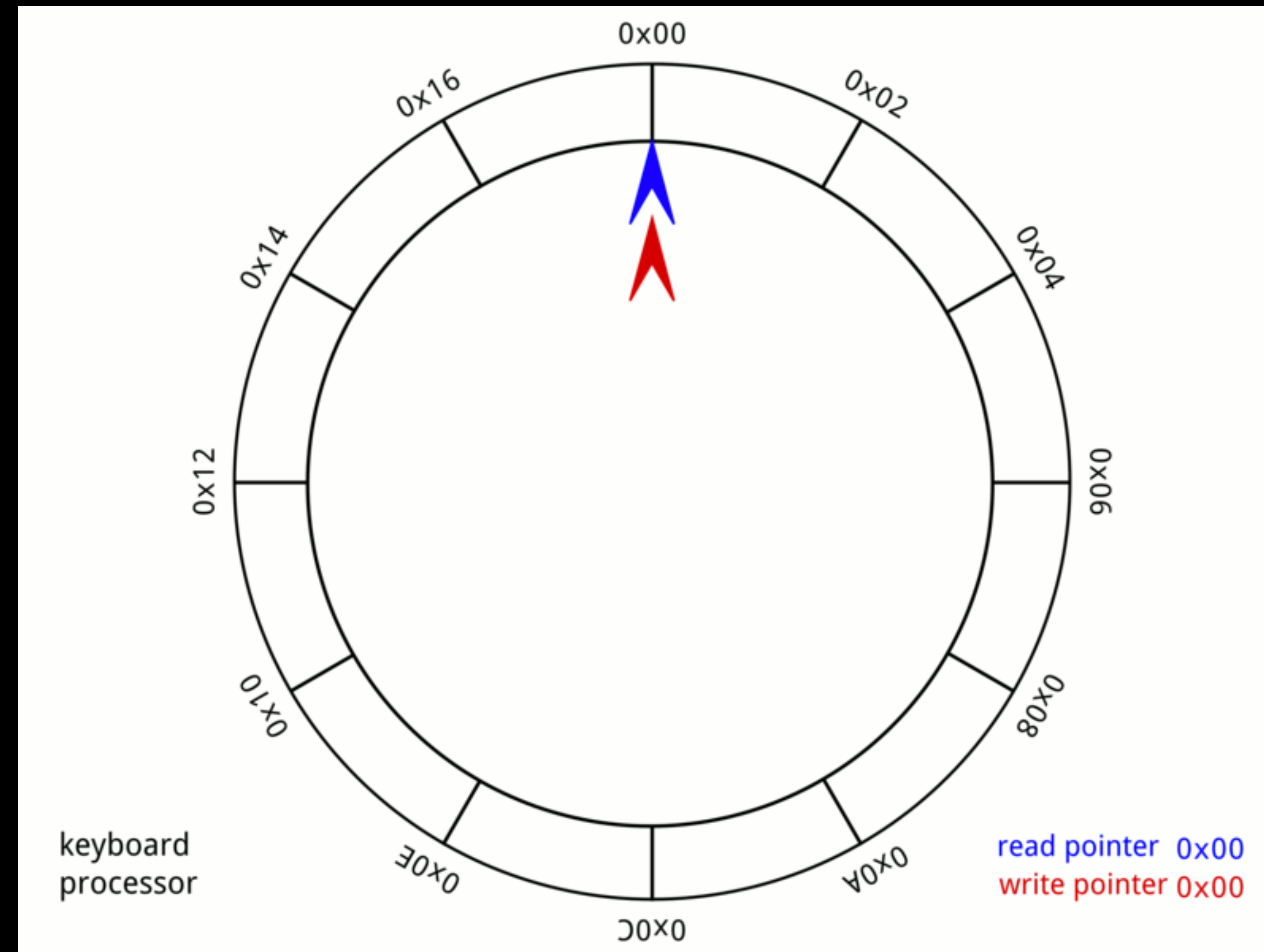
```
static Arbitrary<Action<MyStringStack>> actions() {  
    return Arbitraries.oneOf(push(), clear(), pop());  
}  
private static Arbitrary<Action<MyStringStack>> push() {  
    return Arbitraries.strings().alpha().ofLength(5).map(PushAction::new);  
}  
private static Arbitrary<Action<MyStringStack>> clear() {...}  
private static Arbitrary<Action<MyStringStack>> pop() {...}
```

```
class MyStackProperties {  
    @Property  
    void checkMyStackMachine(  
        @ForAll("sequences") ActionSequence<MyStringStack> sequence  
    ) {  
        sequence.run(new MyStringStack());  
    }  
    @Provide  
    Arbitrary<ActionSequence<MyStringStack>> sequences() {  
        return Arbitraries.sequences(MyStringStackActions.actions());  
    }  
}
```

# Demo

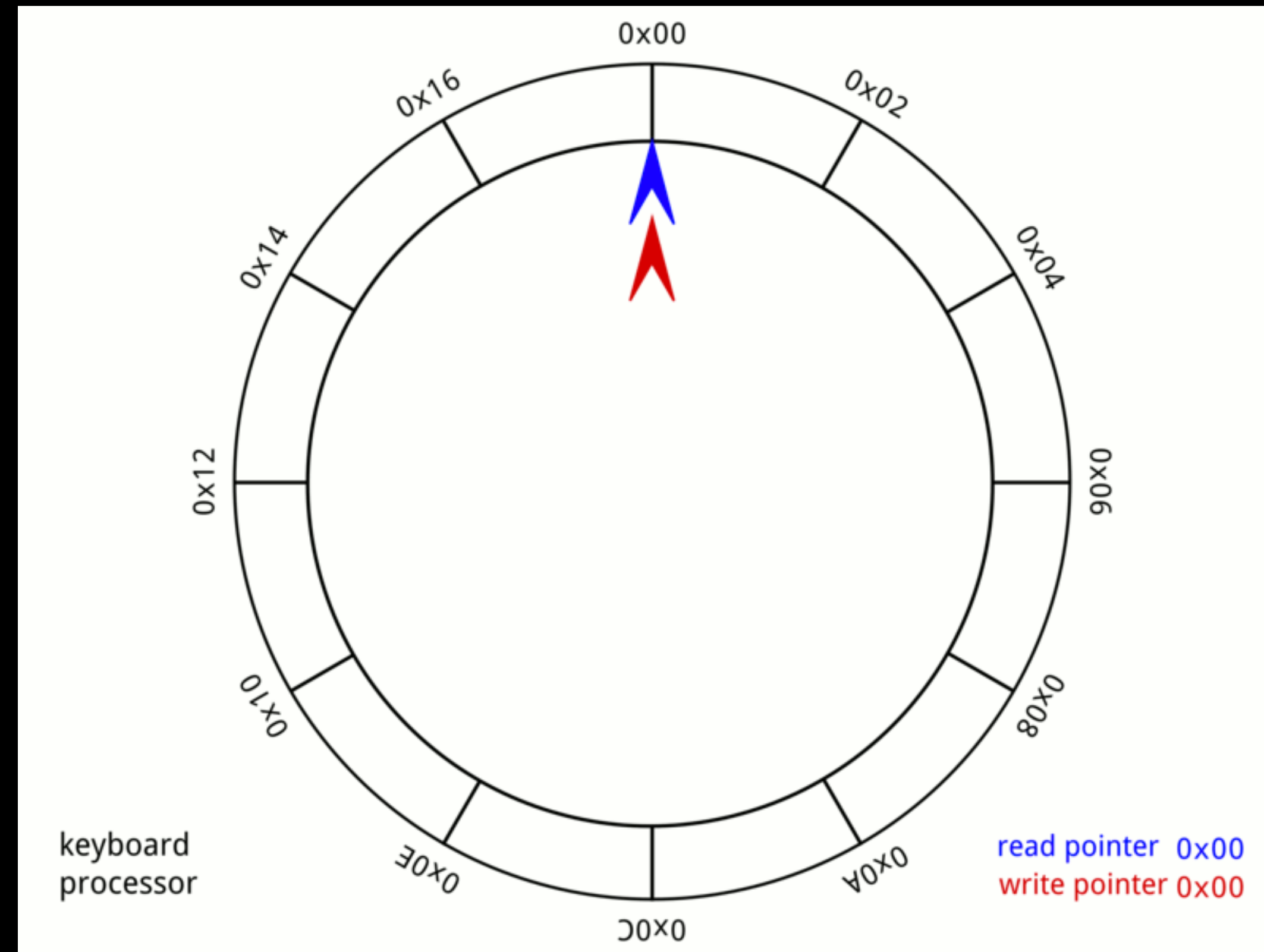
- *MyStackProperties*

# Exercise 4: **Verify and Fix** implementation of `CircularBuffer`



[https://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_buffer#/media/File:Circular\\_Buffer\\_Animation.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_buffer#/media/File:Circular_Buffer_Animation.gif)

# Exercise 4: **Verify and Fix** implementation of **CircularBuffer**



[https://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_buffer#/media/File:Circular\\_Buffer\\_Animation.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_buffer#/media/File:Circular_Buffer_Animation.gif)

# A Circular Buffer...

- has a fixed capacity
- can accept element through PUT
- will return element through GET
- will return number of current elements through SIZE
- **cannot** accept elements beyond its capacity
- **cannot** return elements when empty

# Exercise 4: **Verify and Fix** implementation of `CircularBuffer`

1. Discuss and write down:

- ▶ What are the actions and their effect on a circular buffer's state?
- ▶ Are there any invariants?

2. Add missing actions and action classes in `CircularBufferActions`

3. Run `CircularBufferProperties.checkBuffer()`

- ▶ Print out the *actual run* sequences

4. Add invariants to `CircularBufferProperties.checkBuffer()`



# Exercise 4: Debriefing

- Why do we need a special Action model here?
- Why does `@Report(GENERATED)` not show the *actual run sequences*?

# Lessons Learned

- Beispiel-basierte Tests...
  - ▶ sind oft bessere Treiber für **das funktionale Verhalten**
  - ▶ helfen oft besser beim **Verstehen des Codes**
- Interaktion mit externen Welt  
machen Properties **langsam**
- Randomisierte Tests werden leichter **nicht-deterministisch**
- Investiere in **domänen-spezifische** Generatoren!

# Die Zukunft von jqwik

- Mehr Default-Providers
  - ▶ z.B. für `java.time.*`
- Groovy/Kotlin-DSL
- Zusätzlicher Support für Contract Testing

# Alternative PBT-Tools für Java

- **JUnit-Quickcheck:**  
Enge Integration mit JUnit 4
- **QuickTheories:** Arbeitet mit beliebigen Test-Libraries zusammen
- **Vavr:** Die funktionale Java-Bibliothek hat auch ein eigenes PBT-Modul

jqwik auf Github:

<http://github.com/jlink/jqwik>

**Mitstreiter gesucht!**

Code:

<http://github.com/jlink/pbt-workshop>

Slides:

<http://johanneslink.net/downloads/pbt-workshop-deutsch.pdf>

Blog:

[http://blog.johanneslink.net/2018/03/24/  
property-based-testing-in-java-introduction/](http://blog.johanneslink.net/2018/03/24/property-based-testing-in-java-introduction/)