

Entwicklung domänenspezifischer Sprachen mit ANTLR am Beispiel eines Pac-Man-Klons

Studiengang Medieninformatik Master
Beuth Hochschule für Technik Berlin

Marcel Brüning
s67176@beuth-hochschule.de

Simon Lischka
simon@lischka.co

Marcel Piater
s67357@beuth-hochschule.de

Zusammenfassung—Die folgenden Seiten beschreiben die Entwicklung eines Pac-Man Browserspiels mit JavaScript. Die Schwerpunkte des Projekts liegen in der automatischen Codegenerierung mit domänenspezifischen Sprachen (DSL) für die Levels und die artifizielle Intelligenz (AI). Die DSL der AI definiert verschiedene Strategien der vom Computer gesteuerten Spielfiguren.

I. ÜBER DAS SPIEL

Der Inhalt dieses Absatzes ist das Spielprinzip von Pac-Man und die Entwicklung der Spiellogik. Dabei werden die eingesetzten Technologien beschrieben.

A. Spielprinzip

Pac-Man ist eine Spielfigur, die durch ein Labyrinth so effektiv wie möglich gesteuert werden soll, um alle vorhandenen Punkte zu sammeln. Bewegliche Gegner (vier Geister), die vom Computer gesteuert werden, sowie ein komplexes Labyrinth erschweren den Siegeszug. Pro Spiel verfügt Pac-Man über drei Leben. Wird er von einem Gegner gefasst, so geht ein Leben verloren. In dem Labyrinth gibt es durch das Sammeln von Münzen die Möglichkeit, die Gesamtpunktzahl zu erhöhen.

Über Früchte in den Ecken des Spielfelds gelangt Pac-Man in den Angriffsmodus. Er wird für kurze Zeit vom Gejagten zum Jäger und kann seinerseits Geister fressen. Das verhilft ihm zu zusätzlichen Punkten. Schafft es Pac-Man innerhalb der drei Leben sämtliche Punkte auf dem Spielfeld zu konsumieren, so hat er das Level erfolgreich absolviert und startet ein neues Level.

B. Verwendete Technologien

Das Spiel ist in JavaScript implementiert. Teile des Codes werden mit dem Parser-Generator ANTLR4 auf Basis der DSL erzeugt. Dieser Code wird von der Applikation angesteuert.

Ein naheliegender Gedanke in der Planungsphase war es, die JavaScript-Implementierung von ANTLR4 zu verwenden. Auf diese Weise ließe sich eine einheitliche Programmiersprache in der gesamten Codebasis einsetzen. Ein programmiertechnischer Austausch zwischen allen Teammitgliedern könnte dadurch erleichtert werden. Dieser Austausch kann aus Code-Reviews und dem Klären von sprachspezifischen Problemen bestehen.

Da die Java-Implementierung von ANTLR4 etablierter erscheint und über ausführlichere Dokumentation verfügt als die JavaScript-Variante, haben wir von der Verwendung von ANTLR4 für JavaScript abgesehen. Wir hatten die Vermutung, dass die zusätzliche Einarbeitungszeit und für uns unerwartetes Verhalten der JavaScript-Implementierung den zeitlichen Rahmen des Projektes übersteigen würde.

Wir haben jedoch für die JavaScript-Codebasis gezielt Technologien zur Qualitätssteigerung ausgewählt. Hierzu gehört das Framework `RequireJS`, welches die Modularisierung und das Importieren von Klassen ähnlich wie in Java ermöglicht. Von ANTLR4 erzeugte JavaScript-Klassen müssen als Module ladbar sein. `RequireJS` war für uns deshalb Voraussetzung um unser Vorhaben erfolgreich umsetzen zu können.

Objektorientiertes Programmieren nach dem Paradigma *Separation of Concerns* (SoC) und der Aufbau einer übersichtlichen Projektstruktur werden durch Trennung von Klassen in einzelne Dateien durch `RequireJS` ebenfalls stark erleichtert.

`Underscore.js` bietet eine Reihe von Helferfunktionen, die darauf ausgerichtet sind, funktionale Programmierung zu erleichtern¹. Mit `Underscore.js` sind häufig eingesetzte Idiome wie Listeniterationen in kürzerer Syntax und auf höherem Abstraktionsgrad als durch native JavaScript-Sprachmittel abbildbar. Hierdurch ergibt sich weniger Raum für Fehler.

Kritische Funktionen wurden in JavaScript mit `Jasmine-Unit Tests` versehen. Eine hohe Testabdeckung, wie sie mit Test Driven Development möglich ist, haben wir jedoch nicht priorisiert.

C. Umsetzung

Das zu spielende Level besteht aus einem 2-dimensionalen Array. Die Elementes des Spielfelds sind durch Zahlencodes abgebildet. Eine Null steht dabei für ein freies Stück Weg. Codes Eins und Zwei stehen für ein begehbares Feld mit einem Punkt oder einer Frucht. Wände werden durch Code Drei repräsentiert und sind von Pac-Man und den Gegnern nicht begehbar.

¹Underscore.js Einführung, <http://underscorejs.org/>

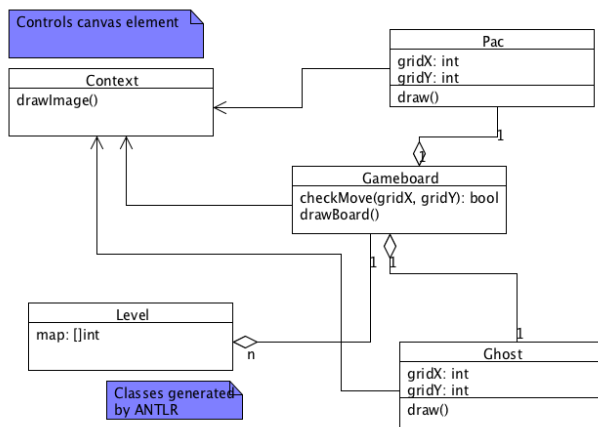


Abbildung 1. Reduziertes Klassendiagramm der zentralen Spielklassen

Zur Darstellung laden wir Bildobjekte und zeichnen sie auf einem Canvas-Element des HTML Dokuments. Zum Darstellen der Bildobjekte wird durch das Array iteriert und für jedes Array-Element ein dem Zahlencode zugehörige Bildobjekt auf den 2D-Kontext des Canvas gezeichnet.

Ein zweites Canvas-Element stellt Spielfiguren dar. Es ist transparent über dem Canvas-Element des Levels positioniert. Die Motivation hierfür ist, dass der Zustand der Spielfiguren sich in der Regel häufiger ändert als der des Spielfeldes. Ein Flackern, was durch zusätzliches Neuzeichnen des Levels bei jeder Figurveränderung entstehen kann, wird durch Trennung in zwei Canvas-Elemente reduziert.

Die Figuren operieren auf dem selben Koordinatensystem wie das Level. Abbildung 2 zeigt das ausgeführte Spiel.

Das Klassendiagramm in Abbildung 1 stellt die beteiligten JavaScript-Objekte dar. Die Objekte von Spieler und Gegner (Pac und Ghost) führen die Instanzvariablen `gridX` und `gridY`, die Koordinaten des Levels sind. Die Funktion `checkMove()` der Klasse `Gameboard` gleicht den nächsten Schritt einer Figur mit dem Array des Levels ab. Bei Zahlencode Null, Eins oder Zwei liefert sie `true` zurück und erlaubt den gewünschten Schritt der Figur. Entsprechend wird bei einer Drei, also einer Wand `false` zurückgeliefert und verhindert somit den nächsten Schritt der Spielfigur. Diese Funktion wird von Klassen `Ghost` und `Pac` bei der Umsetzung des nächsten Spielzugs verwendet.

Um die Bewegungen der Figuren sichtbar zu machen, existiert die Funktion `updateOnInterval()`, die durch den Scheduler des Browsers alle 150 Millisekunden aufgerufen wird. Sie zeichnet das Level und die Spielfiguren nach vorgenommener Aktualisierung neu. In der Methode werden Kollisionsabfragen der Klasse `GameBoard` aufgerufen, die prüfen ob Pac-Man gerade einen Punkt bzw. eine Frucht frisst (Methode `checkPacsEating()`) oder mit einem Geist kollidiert (Methode `checkKills()`). Die im Spiel agierende AI berechnet in jedem Interval die Richtung der Geister neu. Ihre Berechnung bezieht sich also immer genau auf einen Spielzug.

Abbildung 3 stellt das FMC-TAM Diagramm des Spiels dar.

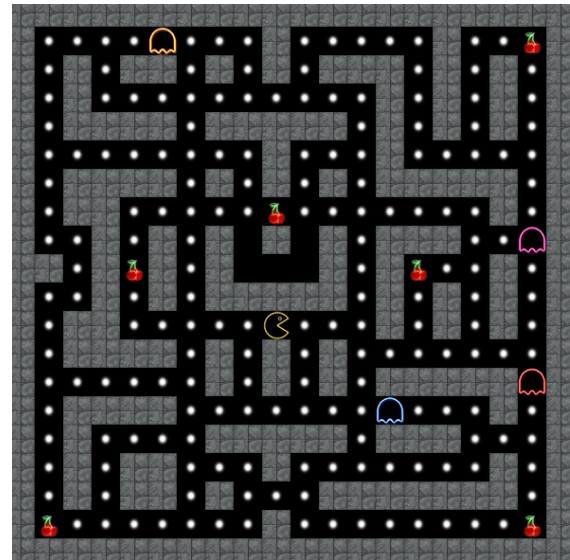


Abbildung 2. Screenshot des ausgeführten Pac-Man Spiels.

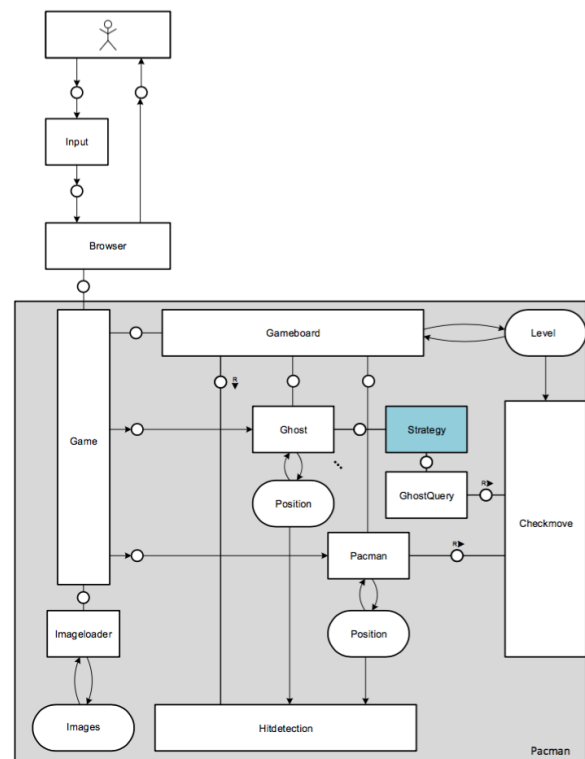


Abbildung 3. FMC-TAM Diagramm der umgesetzten Applikation

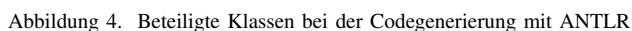
Ghost und Pac-Man sind als Akteure dargestellt, die ihre Position in Abstimmung mit dem Ergebnis von `checkMove()` aktualisieren. Akteur `Strategy` und Speicher `Level` werden durch ANTLR4 generiert. Im Zusammenhang mit `Strategy` ist Mittler `GhostQuery` relevant. `GhostQuery` stellt die Schnittstelle des generierten Codes zum Spiel dar und wird bei der Beschreibung der AI DSL in Abschnitt II-B näher erläutert.

Interessant ist, dass die Akteure sich nicht auf eine einheitli-

Es ist wahrscheinlich, dass eine Auslagerung von Hitdetection in eine eigenständige Klasse bei zunehmender Komplexität sinnvoll wäre und dadurch das Design durch die Einhaltung des SoC-Paradigmas verbessert werden würde. Durch die Aufstellung des FMC-TAM Diagramms lässt sich diese bevorstehende Designänderung antizipieren, auch wenn wir uns in der vorliegenden Implementierung dazu entschlossen haben, sie nicht umzusetzen.

ANTLR4 generiert auf Grundlage der DSL Lexer zur lexikalischen Analyse und Parser zur syntaktischen Analyse. Wir haben uns bei der Umsetzung der Level- und der AI DSL für das Einsetzen von Listener Klassen zum Traversieren des Abstrakten Syntaxbaums (AST) entschlossen.

Erst nach Beenden der Traversierung werden die Daten in der Klasse `CodeGenerator` durch Interpretation der Datenstrukturen, die in den Listnern erzeugt wurden, geschrieben. Abbildung 4 stellt die beteiligten Klassen dar. Bei `totalValues` und `initialRoot` handelt es sich um diese Datenstrukturen.



Eine Level DSL entspricht dem CSV-Format. In der Java Klasse `LevelBaseListenerImplementation.java`, welche von `LevelListener.java` erbt, wird eine verschachtelte Listenstruktur erzeugt, die das Spielfeld Zeilen- und Felder-weise abbildet. Die `parseLevel()` Methode, welche in der

Die CodeGenerator.java Klasse ist neben der Generierung für die AI auch für die Erstellung einer level.js Datei zuständig welche nach JavaScript Syntax erstellt wird. Die Datei level.js (Abbildung 1) wird direkt in dem Ordner /dsl_pacman/pacman/levels/ generiert und von der Gameboard-Klasse importiert.

[illegible]

1) *Spiefeldaufbau*: Das Spielfeld bildet ein zweidimensionales Array ab, welches je nach Spielfeld-Design mit Zahlen von Null bis Drei befüllt wird. Die Spezifikation sieht vor, dass ein Array der Größe von exakt 20x20 erstellt werden muss. Eine beispielhafte Darstellung, die das Prinzip für den Aufbau des Spielfeldes veranschaulicht, ist in Listing I zu finden.

2) *Grammatik*: Um den korrekten Aufbau des Spielfelds zu gewährleisten werden zunächst domänenspezifische Gültigkeitsregeln festgelegt. In unserem Fall sind diese durch Zahlen, Sonderzeichen und reguläre Ausdrücke repräsentiert. Die Anzahl der erlaubten Spalten ist nicht in der DSL spezifi-

Tabelle I
SPIELFELD-DEFINITION PER DSL

3	3	3	3	3	0 1 2 3	freier Weg Punkt Frucht Mauer/Hindernis
3	2	1	1	3		
3	1	0	1	3		
1	1	1	2	3		
3	3	3	3	3		

Tabelle II
RICHTUNGSTOKENS DER AI DSL MIT EXAMPLARISCHER BELEGUNG DER TOKENS

Token	Beschreibung	Richtung			
->	Aktuelle Richtung	R	L	U	D
<-	Entgegengesetzte Richtung	L	R	D	U
=>	Alternative Richtung	D	U	L	R
<=	Entgegengesetzt alternative Richtung	U	D	R	L

ziert. Sie wird in der `LevelListenerImplementatino` überprüft. Die im vorherigen Absatz ?? festgelegten Regeln werden in der Datei `level.g4` (Listing 2) formal festgelegt um dann mit dem ANTLR4 Tool Java Code zu generieren welcher zur Überprüfung der Gültigkeit des aufzubauenden Spielfeldes (Vergl. Listing1) verwendet wird.

```
grammar Level;

field: row* EOF ;
row: value (Separator value)* (LineBreak | EOF) ;

value: Value ;
Separator: ';' ;
LineBreak: '\r'?'\n' | '\r';
Value: ('0'|'1'|'2'|'3')+ ;
```

Listing 2. Auszug aus der DSL spezifizierenden Grammatik `level.g4`

B. AI DSL

Die durch Intrepretation der AI DSL generierten JavaScript-Klassen ermittelt auf Basis der aktuellen Richtung eines Geistes dessen Richtung für den folgenden Spielzug. Eingabe und Ausgabewert einer AI ist also die Richtung eines Geistes. Aus diesem Grund ist ein Verständnis der Tokens nötig, die für das Ausdrücken einer Richtung eingesetzt werden.

Tabelle II stellt die Richtungs-Tokens dar. Hier wird durch die DSL insofern eine Abstraktion vorgenommen, als das eine Richtung relativ angegeben wird. Token `->` wird mit einem Wert aus der Menge `{UP, DOWN, RIGHT, LEFT}` belegt. Beim Verfassen der AI muss nicht mehr beachtet werden, welche Richtung dieser Token bei der Ausführung des Spiels entspricht. Relevant für die Entwicklerin oder den Entwickler ist es zu entscheiden ob ein Geist in der bisherigen Richtung weiterläuft, in eine der alternativen Richtungen ausweicht oder umkehrt. Die entstehende Simplifizierung wird durch den Pseudocode in Listing 3, der das Laufen in die entgegengesetzte Richtung implementiert.

```
if DIRECTION == RIGHT:
    return LEFT
elif DIRECTION == LEFT:
    return RIGHT
elif DIRECTION == UP:
    return DOWN
```

Tabelle III
OPERATOREN MIT SYNTAXBEISPIEL, DIE METHODE CHECKMOVE ANSTEUERN

	Syntax	Beschreibung	Beispiel
if*	<pre>if *(DIR) { //BLOCK A } else { //BLOCK B }</pre>	<i>If-Free Operator</i> Ausführen von A, wenn Richtung DIR frei. Sonst Ausführen von B.	<pre>if *(->) { -> } else { <- }</pre>
**	<pre>**{ DIR; DIR; }</pre>	<i>Filter-Free Operator</i> Richtung die nicht begehbar sind, werden entfernt.	<pre>**{ =>; <=; }</pre>
*n	<pre>*1{ DIR; DIR; }</pre>	<i>Filter-FreeN Operator</i> Filter gemäß Filter-Free Operator, Auswahl des n-ten Elements.	<pre>*1{ =>; <=; }</pre>

```
elif DIRECTION == DOWN:
    return UP
```

Listing 3. Umkehren der Richtung in Pseudocode

Da die DSL die Notwendigkeit von Conditionals zur einzelnen Behandlung der Richtung entfernt, würde in Syntax der DSL ein `<-` Token genügen, um die Logik des Pseudocodes abzubilden.

Pac-Man AI DSLs beginnen mit dem Namen der DSL in runden Klammern. Innerhalb dieses Blocks werden Operatoren erwartet. Entscheidend für das Auswählen einer Richtung ist oftmals, ob diese frei ist. Wie in Absatz I-C beschrieben, ist im JavaScript-Spiel der Akteur *Checkmove* dafür zuständig, eine Auskunft darüber zu geben, ob eine Richtung frei ist. Die DSL bietet die in Tabelle III gelisteten Operatoren an, um *Checkmove* anzusteuern.

Bei den Operatoren ist zu beachten, dass der *If-Free*- und *Filter-FreeN*-Operator jeweils eine einzelne Richtung als Rückgabewert besitzen, wohingegen der *Filter-Free*-Operator eine Liste von Richtungen zurückgibt. Der Begriff des Rückgabewerts bildet sich auf aufgerufene JavaScript Methoden der von ANTLR4 compilierten DSL ab.

Der *Filter-Free*-Operator darf also beispielsweise nicht als äußerster Block einer DSL stehen, da mehrere Werte zurückgegeben werden aber nur eine einzige Richtung den Folgespielzug bestimmt. Da JavaScript eine dynamisch typisierte Sprache ist, würde ein Laufzeitfehler aufgrund eines unerwarteten Listen-Typs auftauchen. Dies ist unerwünscht, weil der Fehler spät in der Verarbeitungskette auftaucht und dessen Ursprung schwer zurückzuverfolgen ist. Eine entsprechende Validierung bei der Kompilierung der DSL wäre möglich und sinnvoll, wurde in der vorliegenden Implementierung jedoch nicht umgesetzt.

Die DSL in Listing 4 benutzt den *Filter-FreeN*-Operator um die erste der übergebenen Richtungen auszuwählen, die frei ist. Klar sichtbar ist, dass ein weiterlaufen in der aktuellen Richtung (`->`) vorzuziehen ist, und versucht werden soll in eine der alternativen Richtungen (`=>`, `<=`) auszuweichen, bevor umgekehrt wird (`<-`).

```
simple(
  *1{
```

```

->;
=>;
<=;;
<-;;
}
)

```

Listing 4. AI DSL mit FFilter-FreeN-Operator

Zum zufälligen Auswählen von Richtungen führen wir den Random-Operator (Tabelle IV) ein.

Tabelle IV
RANDOM OPERATOR MIT SYNTAXBEISPIEL

	Syntax	Beschreibung	Beispiel
%	{ DIR; DIR; }	<i>Random Operator</i> Aus den Richtungen DIR wird zufällig ein Wert ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit ist durch den ratio-Parameter r festgelegt.	if *(->) { -> } else { <- }

Durch die vorgestellte Sprachmitteln lassen sich nun auch komplexere Strategien abbilden. In der DSL aus Listing 5 ist ein If-Free-Block zu sehen. Ist die aktuelle Richtung des Geistes nicht frei, so wird der else-Block ausgewertet und mit Hilfe des Filter-FreeN-Operators die erste freie Richtung gemäß der gleichen Rangordnung von Listing 4 gewählt. Ist die aktuelle Richtung frei, so soll mit Hilfe einer Zufallsverteilung entschieden werden, ob diese weitergegangen oder eine der freien alternativen Richtungen eingeschlagen werden soll.

```

random(
  if *(->) {
    %(50:25:25) {
      ->;
      **{
        =>;
        <=;;
        <-;;
      }
    }
  } else {
    *1 {
      =>;
      <=;;
      <-;;
    }
  }
)

```

Listing 5. AI DSL mit If-Free-Block und Zufallsverteilung

In Listing 5 ist sichtbar, dass der Filter-Free Operator mit dem Random Operator geschachtelt wurde. Die DSL erlaubt beliebige Schachtelungstiefen. Beispielsweise die Syntax von Listing 6 ebenfalls zulässig.

```

if *(->) {
  %(50:25:25) {
    ->;
    **{
      %(50:25:25) {
        ->;
        **{
          =>;
          *1{
            <-;;
            ->;

```

```

        }
      }
    }
  }
}

```

Listing 6. Komplexere Verschachtelung in AI DSL

Eine beliebige Verschachtelungstiefe, wie durch Listing 6 demonstriert, wird nicht *direkt* durch die Grammatik definiert. Die AI-Grammatik erkennt lediglich die notwendigen Tokens (Listing 7).

```

ai_body: WS* (LINE_BREAK|COMMENT|bracket_close|
  block_declaration||direction_statement);
bracket_open: '{';
bracket_close: '}';
block_declaration: (if_free_statement|
  else_free_statement|random_statement|
  leave_free_statement|get_nth_free_statement);

```

Listing 7. Ausschnitt der AI Grammatik

Das Aufbauen einer rekursiven Baumstruktur erfolgt in der Listener Implementation. Hierzu wird für jeden geparsen *Operator* eine Klasse erstellt, die von der abstrakten Klasse *Node* erbt.

Node
nodes: List<Node>
parent: Node
addChild(n: Node)
getParent(): Node
setParent(p: Node)
renderCode(): String {abstract}
childCode(): String

Abbildung 5. Node-Basisklasse als Halter der Datenstruktur zu Codegenerierung

Alle Unterklassen von *Node* (Abbildung 5) enthalten intern eine Listen-Struktur, in der Kinder-Nodes geführt werden. Jeder *Node* implementiert eine *renderCode()*-Methode, die JavaScript-Quellcode erzeugt. Der Quellcode der Kinder-Nodes wird durch Methode *childCode()* erzeugt, die über die Kinder-Nodes iteriert, jeweils *renderCode()* aufruft und die Ergebnisse konkateniert. Methode *childCode()* wird per Konvention in jeder *Node*-Klasse bei *renderCode()* aufgerufen. Eine *Node* Klasse, erzeugt beim Code-Generieren ebenfalls den JavaScript-Quellcode seiner Kinder. Zum Erzeugen der kompletten AI-JavaScript Klasse reicht das Aufrufen von *renderCode()* auf dem Wurzelknoten, der im Listener als Instanzvariable *initialNode* geführt ist (siehe Abbildung 4). Abbildung 6 zeigt die entstehende Baumstruktur zur DSL von Listing 5.

Der entstehende JavaScript-Code zur DSL in Listing 5 ist in Listing 8 aufgeführt.

```

define([], function() {
  var strategy = function(queries) {
    var direction = queries.currentDirection();

```

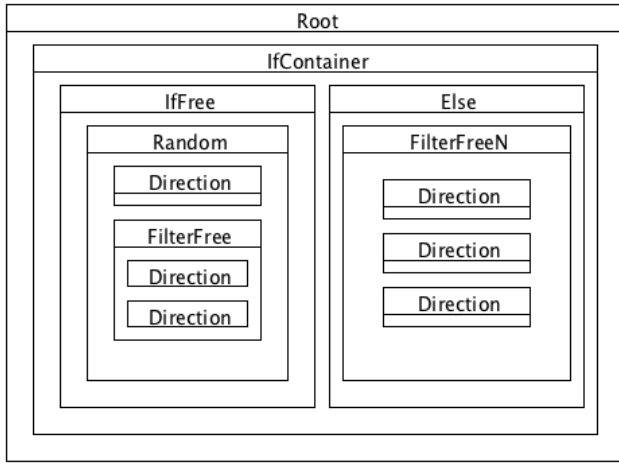


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Datenstruktur beim Parsen einer AI DSL (Laufzeit).

```

return (function() {
  if (queries.isFree(direction)) {
    return queries.
      randomWithDistribution([
        50, 25, 25
      ], [
        direction,
        queries.filterFree([
          queries.alternative(
            direction),
          queries.alternativeOpposite(
            direction)
        ])
      ])
  }
  else {
    return queries.filterFreeN(1, [
      queries.alternative(direction),
      queries.alternativeOpposite(
        direction),
      queries.opposite(direction)
    ])
  }
})();
return strategy;
});

```

Listing 8. Beispiel zu generiertem JavaScript-Code einer AI DSL

Tabelle V zeigt die Abbildung der Tokens der DSL auf JavaScript-Methoden der Klasse GhostQueries, die der Funktion strategy der generierten AI-Klasse als Parameter queries übergeben wird. In der Darstellung werden ebenfalls die Parameter- und Rückgabetypen dieser Methoden aufgezeigt.

Klasse GhostQueries dient als Mittler der generierten Strategie mit dem Ghost-Objekt. Sie ruft Methoden currentDirection, gridX(), gridY() und checkMove() auf. Der Aufruf von checkMove() wird von Klasse Ghost an Gameboard delegiert. Der Aufruf der generierten Strategie mit Übergabe des Parameters GhostQueries wird in Abbildung 7 dargestellt.

Neben der Abstraktion bezüglich der Richtungen (siehe Absatz II-B) sorgt Klasse GhostQueries dafür, dass

Tabelle V
MAPPING VON AI-TOKENS AUF JAVASCRIPT METHODEN DER KLASSE
GHOSTQUERIES

Op	Methode in GhostQueries
->	currentDirection(): <i>String</i>
<-	opposite(direction: <i>String</i>): <i>String</i>
=>	alternative(direction: <i>String</i>): <i>String</i>
<=	alternativeOpposite(direction: <i>String</i>): <i>String</i>
if*	isFree(direction: <i>String</i>): <i>Boolean</i>
**	filterFree(directions: <i>List<String></i>): <i>List<String></i>
*n	filterFreeN(n: <i>Number</i> , directions: <i>List<String></i>): <i>String</i>
%	randomWithDistribution(ratios: <i>List<Number></i> , dirs: <i>List<String></i>)

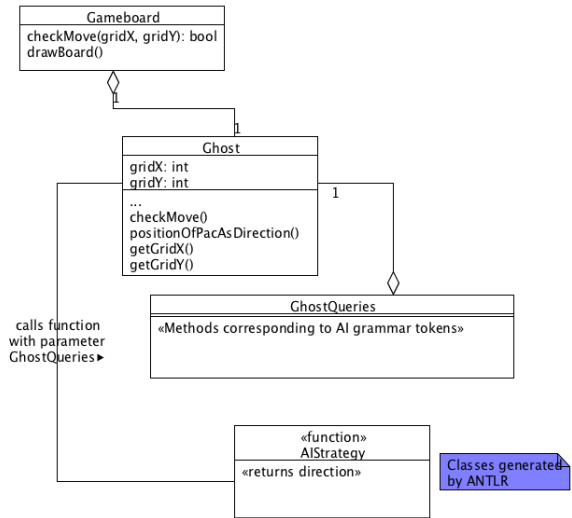


Abbildung 7. Aufruf der generierten Strategie-Methode durch Klasse Ghost.

Listenstrukturen bei verschachtelten Aufrufen korrekt vereint werden. Eine Verschachtelung des Random-Operators mit Filter-Free-Operator, wie in Abbildung 6 gezeigt, hat zur Folge dass Parameter directions der randomWithDistributions()-Methode mit einer verschachtelten Liste befüllt wird. Die Ursache ist, dass es sich beim Ergebnis des Filter-Free-Operator ebenfalls um eine Liste handelt. Ein Beispiel einer entstehende Datenstruktur des directions-Parameter ist in Listing 9 zu sehen.

```

[
  "UP",
  "DOWN",
  [
    "LEFT",
    "RIGHT"
  ]
]

```

Listing 9. Beispiel einer verschachtelten Datenstruktur als directions-Parameter von randomWithDistributions()

Die Vereinigung der Liste wird durch die underscore.js-Methode flatten vorgenommen. Die Idiome zur Iteration von underscore.js bestehen aus Funktionen, die als Parameter zum einem die zu iterierende Listenstruktur übergeben bekommen und zum anderen eine Funktion die das jeweilige Listenelement als Parameter empfängt. Für die Implementierung

der Klasse GhostQueries war es sehr hilfreich, sprechende Schreibweisen wie die aus Listing 10 einsetzen zu können. Die Syntax erinnert an moderne Programmiersprachen wie Python oder Scala, die funktionale Idiome unterstützen.

```
return _.filter(_.flatten(directions), function(d) {
    return isFree(d);
});
```

Listing 10. Implementierung der Filter-Free Methode mit Hilfe von funktionalen Hilfsmitteln von underscore.js

III. FAZIT UND AUSBLICK

Ziel dieses Projekts war die Umsetzung eines funktionsfähigen Pac-Man-Klons. Ein Teil des Quellcodes sollte aus vorher detailliert spezifizierten Modellen automatisch generiert werden. Dabei wurden zwei DSLs eingesetzt. Zum einen eine DSL für die Erstellung des Spielfeldes und zum anderen eine AI DSL für die Umsetzung verschiedener Strategien für die Bewegung der von Computer gesteuerten Figuren. Somit ist es möglich verschiedene Leveldesigns bzw. unterschiedliche Bewegungsstrategien (Erhöhung des Schwierigkeitsgrades) unabhängig vom Basiscode des Spiels zu generieren. Alle im Vorfeld gesetzten Kriterien wurden erfolgreich umgesetzt.

Bei der Implementierung der AI DSL hat sich bewährt, eine Baumstruktur in der entsprechende Listener-Klasse aufzubauen um diese bei der Codegenerierung zu traversieren. Hierbei taucht allerdings das Problem auf, dass ANTLR4 keine syntaktische Validierung in Bezug auf den Aufbau dieser Baumstruktur vornimmt. Es ist also ohne manuell implementierte Validierungen nicht zu gewährleisten, dass die Operatoren der AI DSL korrekt miteinander kombiniert werden - im schlimmsten Fall resultiert ein Laufzeitfehler im JavaScript Code.

In der Klasse AiBaseListenerImplementation wurde ein erster Ansatz implementiert, eine solche Validierung vorzunehmen (Listing 11). Um eine Aussagekraft für den Anwender zu haben, müsste jedoch eine präzisere Fehlermeldung mit entsprechender Zeilennummer der interpretierten DSL ausgegeben werden. Es ist abzusehen, dass der verfolgte Ansatz bei einer Erweiterung der Grammatik ungenügend ist. Hier wäre eine noch tiefere Auseinandersetzung mit ANTLR4 empfehlenswert, um womöglich einen standardisierten Lösungsweg verfolgen zu können.

```
private void add(Node n) {
    if ((n instanceof Else) && !(currentNode
        instanceof IfContainer)) {
        System.out.println("Tried to add else
            without preceding if block");
    }
    if (!(n instanceof Else) && !(n instanceof
        IfFree) && currentNode instanceof
        IfContainer) {
        System.out.println("Illegal state, possible
            programming error: Opened an IfContainer
            and trying to add other than if or else
            block.");
    }
    this.currentNode.addChild(n);
    // Flat elements that can't contain child nodes
    // should not set themselves as currentNode
}
```

```
if (!(n instanceof Direction || n instanceof
    Reference || n instanceof Assignment)) {
    this.currentNode = n;
}
}
```

Listing 11. Grundlegende Validierung beim Hinzufügen eines einer Node in AiBaseListenerImplementation

Spezialisierte Unit-Tests für die AI DSL aufzustellen wäre ein weiterer Schritt, um die Qualität der Implementierung zu erhöhen. Eine hohe Zuverlässigkeit auf Seite der DSL Implementation zu beheben wäre im realen Anwendungsfall eine Notwendigkeit.

Das Erzeugen von Code mit Hilfe von DSLs scheint in dem gegebenen Anwendungsfall in Hinblick auf Arbeitsteilung im Team äußerst sinnvoll. Es ist wahrscheinlich, dass bei einer komplexeren Pac-Man Anwendung eigenständige Teams für Level-Gestaltung und AI-Entwurf eingesetzt werden würden. Diese Teams sollten von programmiertechnischen Aspekten der eigentlichen Spiels weitestgehend entkoppelt werden um effektiv arbeiten zu können. Durch Anpassung der Codegeneratoren wären die Anwendungsentwickler in der Lage, nach Bedarf neue Technologien einzusetzen zu können ohne die anderen Teams in ihrer Arbeit zu stören.