

# BPTI: Bomberman in VHDL

von Niklas Metz und Felix Bachmann

8. Februar 2018

## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Allgemeines</b>	<b>4</b>
1. Idee	4
2. Erreichte Ziele	4
3. Steuerung	5
<b>II. Beschreibung der Entities</b>	<b>5</b>
4. bomberman_ent	5
5. game_mechanic_ent	5
5.1. game_state_ent . . . . .	6
5.2. player_ent . . . . .	6
5.2.1. clk_movement_ent . . . . .	7
5.2.2. movement_ent . . . . .	7
5.2.3. bomb_ent . . . . .	8
6. graphics_ent	9
6.1. pixel_gen_ent . . . . .	10
6.2. Sprites . . . . .	10
6.2.1. SpriteExtractor.java . . . . .	10
6.2.2. SpriteROM . . . . .	11
6.2.3. PlayerROM . . . . .	11
6.3. rgb_assign_ent . . . . .	11
7. sync_gen_ent	12
<b>III. Probleme</b>	<b>12</b>
8. Allgemein	12
9. game_mechanic_ent	13
9.1. game_state_ent . . . . .	13
9.2. player_ent . . . . .	14
9.2.1. movement_ent . . . . .	14
10. graphics_ent	15
10.1. pixel_gen_ent . . . . .	15
10.2. Sprites . . . . .	15

**11.sync\_gen\_ent**

**15**

# Teil I.

## Allgemeines

### 1. Idee

Die grundlegende Idee war ein klassisches Bomberman-Spiel, wie man es von älteren Konsolen kennt. Zwei Spieler können sich auf einem Spielfeld bewegen und Bomben platzieren, um Blöcke oder den Gegner zu zerstören.



Abbildung 1: Screenshot eines Bomberman-Spiels

### 2. Erreichte Ziele

Wir haben alle unsere Musskriterien erfüllt. Es gibt zwei Spielfiguren, die sich von den Spielern steuern lassen und sich nicht über Blöcke bewegen können. Das Spielfeld ist durch unzerstörbare und zerstörbare Blöcke sowie leere Felder aufgebaut. Jeder Spieler kann eine Bombe platzieren, die nach einer bestimmten Zeit explodiert. Bei der Explosion werden zerstörbare Blöcke, die sich im Radius der Explosion befinden zerstört. Ebenfalls sterben Spieler, die sich in einer Explosion befinden.

Außerdem haben wir Sprites für alle Blöcke und auch für die beiden Spieler implementiert.

### 3. Steuerung

Knopf	Wirkung
1	Hoch & Runter bewegen
2	Bombe platzieren
3	Links & Rechts bewegen

Tabelle 1: Steuerung

## Teil II.

# Beschreibung der Entities

### 4. bomberman\_ent

bomberman\_ent ist die Top-Level-Architektur. Die Eingänge sind die tatsächlichen Eingaben des Nutzers und auf den Ausgängen liegen die Informationen die für den VGA-Anschluss benötigt werden. In bomberman\_ent werden drei Entities miteinander verbunden. Zuerst die sync\_gen\_ent, die hsync und vsync erzeugt. Außerdem die game\_mechanic\_ent, welche die eigentliche Spiellogik enthält. Zuletzt noch die graphics\_ent, die für die Erzeugung der entsprechenden RGB-Farbwerte zuständig ist. Letzere enthält ausschließlich asynchrone Entities, sync\_gen\_ent und game\_mechanic\_ent enthalten ausschließlich synchrone Entities (wenn nicht anders angegeben, kriegen diese die VGA-Clock als Takt). In bomberman\_ent werden außerdem die beiden Generics TILE\_SIZE und PLAYER\_SIZE definiert und mit 32 initialisiert.

### 5. game\_mechanic\_ent

game\_mechanic\_ent ist die Architektur, welche die eigentliche Spiellogik enthält. Hier werden zwei Spieler vom Typ player\_ent erzeugt und mit der Logik in game\_state\_ent verbunden. Außerdem wird hier entschieden welche Zeilen an die einzelnen Spieler weitergegeben werden. Jeder Spieler benötigt lediglich die Zeile in der er sich befindet, sowie die über und unter ihm, um zu entscheiden, ob er sich in eine bestimmte Richtung bewegen kann.

### 5.1. game\_state\_ent

game\_state\_ent ist einerseits für die Verwaltung des Spielfeldes, aber auch für die Kollisionen verantwortlich. Unser Spielfeld besteht aus insgesamt 15 Zeilen mit jeweils 15 Spalten, wobei jedes Feld durch vier Bits kodiert wird. Die genauen Kodierungen der einzelnen Blöcke kann man Tabelle 1 entnehmen. In dieser Entity wird der Anfangswert für alle Zeilen des Spielfeldes bestimmt, die durch das Ablaufen des Spiels verändert werden können.

Sollte ein Spieler seine Bombe legen, bekommt game\_state\_ent die Position der Bombe, sowie die Information, dass die Bombe gelegt wurde. Daraufhin wird die entsprechende Zeile so geändert, dass die Bombe auch tatsächlich sichtbar ist. Nachdem der Zähler der Bombe abgelaufen ist und sie explodieren soll, wird das entsprechende explode Signal gesetzt. Dann werden die umgrenzenden Blöcke der Bombe überprüft und auf Explosionen gesetzt. Die Blöcke müssen zuerst überprüft werden, um zu verhindern, dass unzerstörbare Blöcke von den Explosionen zerstört werden. Wenn der entsprechende Explosions Zähler in der Bombe abläuft, wird das explosion Signal auf 0 gesetzt und die Felder mit Explosionen werden auf leere Felder geändert.

Desweiteren werden hier die Kollisionen der Spieler erkannt. Sollte sich ein Spieler auf einem Feld befinden, auf dem momentan eine Explosion ist, wird das enable Signal des Spielers auf 0 gesetzt und er stirbt. Dabei verwenden wir jeweils den Mittelpunkt des Spielers als Vergleichswert, um zu entscheiden ob er stirbt oder nicht.

TileID	Bezeichnung
0x0	Leeres Feld
0x1	Explosion
0xD	Bombe
0xE	Zerstörbarer Block
0xF	Unzerstörbarer Block

Tabelle 2: Spielfeld-Kodierungen

### 5.2. player\_ent

Die Entity player\_ent enthält alle Unterkomponenten eines Spielers. Diese sind eine bomb\_ent und movement\_ent (inklusive Clock), da jeder Spieler eine Bombe legen kann und bei Bewegungen auf Kollision mit Kacheln überprüft werden muss. Als Eingabe erhält player\_ent die VGA Clock, ein asynchrones Reset, sowie alle Eingaben des Gamepads (Bewegung in alle 4 Richtungen und den Knopf zum Bombe legen) und einen enable-Eingang. Letzterer verhindert, dass ein Spieler, der bereits von einer Bombe getötet wurde, noch Bomben legen kann. Weitere Inputs sind die Rows des Spielfeldes, welche sich um die aktuelle Spielerposition herum befinden. Als Ausgabe hat player\_ent

die aktuelle Position des Spielers (pixel- als auch kachelweise). Außerdem wird die Kachel-Position und der Zustand der Bombe ausgegeben.

Abbildung 2: Blockdiagramm player\_ent

Bemerkung zur Abbildung: Neben der normalen Verdrahtung wenden wir in player\_ent noch eine Transformation von Pixel- auf Kachelkoordinaten an. Der Übersichtlichkeit halber haben wir dies nicht als asynchrone Entity modelliert, sondern direkt in die strukturelle Beschreibung eingefügt (beim Abbilden der forward-Signale auf die Out-Ports).

### 5.2.1. clk\_movement\_ent

Die Entity clk\_movement\_ent ist ein Clock Divider, die Architecture wird funktional beschrieben. Die Entity wird genutzt, um die Geschwindigkeit der Bewegung der Spieler zu steuern. Es wird alle 78125 Originaltakte die Ausgabe Ausgabe negiert. Da in unserem Design die VGA-Clock genutzt wird, wird somit alle  $\frac{78125 \cdot 2}{25.175 \cdot 10^6} s \approx 6.2ms$  ein Takt erzeugt. Dies hat zur Folge, dass bei ständiger Bewegung eines Spielers in die gleiche Richtung, die pro steigender Takt-Flanke des ausgegebenen Takts stattfindet, die Bewegung vom linken bis zum rechten Rand des Spielfelds (480 Pixel)  $480 \cdot 6.2ms \approx 2.98s$  dauert. Diesen Wert haben wir bei BombermanGB über einen Emulator gemessen und „rückwärts“ den nötigen Zähler, also 78125, bestimmt.

### 5.2.2. movement\_ent

Die Entity movement\_ent wird durch eine Architecture funktional beschrieben und ist für die Bewegung eines Spielers zuständig. Als Eingangssignale erhält die Entity die von clk\_movement\_ent generierte Clock. Weitere in-Ports sind die low-aktiven Signale des Gamepads zum Bewegen des Spielers. Zuletzt kennt die Entity durch Eingangssignale auch den Zustand des Spielfeldes. Dieser wird benötigt, um die Kollision des Spielers mit Blöcken zu prüfen. Die Ausgabe ist die Pixel-Position des Spielers. Diese wird anhand der gewünschten Bewegungsrichtung (durch die Gamepad-Signale gegeben), der in der Entity gespeicherten Pixel-Position vor der Bewegung und des aktuellen Zustandes des Spielfelds berechnet. Die Pixel-Position wird um eine in der Entity definierte Konstante verändert, falls keine Kollision mit einem Block auftritt. Jede Kachel, die nicht leer ist, führt dabei zu einer Kollision. Der Test auf Kollision wird jedoch nur durchgeführt, falls durch die Bewegung eine Kante des Spielers auf eine Kachel bewegt werden würde, auf der sich der Spieler vorher nicht befand.

Beispiel: Sei die Spieler- und Kachelgröße 32x32 Pixel. Die Koordinaten beginnen bei (1,1). Dann wird bei einer Bewegung nach links nur auf Kollision überprüft, falls  $((x - 1)$

mod 32) == 0. Nur in diesem Fall wird eine andere Kachel betreten.

Dadurch ist es dem Spieler möglich von einer Kachel, auf der er eine Bombe gelegt hat, zu entkommen (die Bombe würde auch zu einer Kollision führen). Die Bewegung in x- und y- Richtung kann , falls möglich, parallel geschehen.

### 5.2.3. bomb\_ent

Die Entity bomb\_ent enthält die funktionale Beschreibung einer Bombe. Als Eingabe erhält die Entity die Kachel-Position des zugehörigen Spielers, um beim Legen einer neuen Bombe die Position derselben festlegen zu können. Weitere in-Ports sind das low-aktive Signal des Knopfes auf dem Gamepad zum Legen einer Bombe und das enable-Signal des zugehörigen Spielers. Letzteres wird benötigt, um zu verhindern, dass ein bereits toter Spieler eine neue Bombe legen kann. Die Ausgabe sind die Kachel-Position der Bombe, sowie ein enable- und ein explode-Signal. Beide Signale zusammen ergeben die verschiedenen Zustände der Bombe.

enable, explode	Zustand
0,0	Bombe ist nicht aktiv
0,1	ungültiger Zustand
1,0	Bombe ist auf dem Spielfeld, explodiert aber noch nicht
1,1	Bombe ist auf dem Spielfeld und explodiert

Tabelle 3: Zustände der Bombe

Zur Generierung dieser Signale finden sich in der Architecture zwei Counter. Sobald erfolgreich eine neue Bombe gelegt wurde, wird das enable-Signal auf 1 gesetzt und ein Counter beginnt. Dieser zählt (falls die VGA-Clock als Takt genutzt wird) circa drei Sekunden und symbolisiert das „Ticken“ der Bombe. Sobald dieser Counter heruntergezählt hat, wird das explode-Signal auf 1 gesetzt und der zweite Counter beginnt zu zählen. Dieser zählt circa eine halbe Sekunde. Hat dieser Counter heruntergezählt wird das explode-Signal und das enable-Signal auf 0 gesetzt. Der zweite Counter wird benötigt, damit die Explosion einer Bombe eine gewisse Zeit andauert und auf dem Bildschirm für das menschliche Auge sichtbar wird.

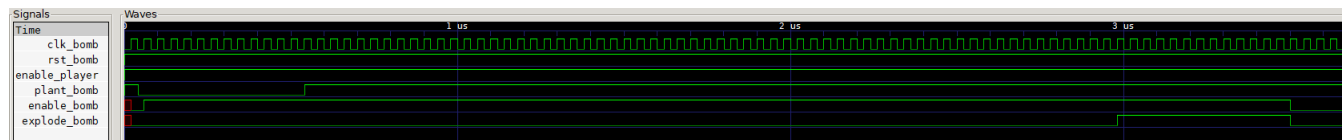


Abbildung 3: Simulation von bomb\_ent  
(Takt-Dauer von 40 ns, Counter um 6 Größenordnungen verringert)



## 6. graphics\_ent

graphics\_ent kapselt die Farbenerzeugung. Als Eingabe bekommt es die Informationen über die Positionen der Spieler und über das Spielfeld, sowie die Position des aktuell zu zeichnenden Pixels (generiert durch sync\_gen\_ent). Aus diesen Werten, wird durch pixel\_gen\_ent entschieden welche Sprites gerade verwendet werden müssen. Anschließend werden die ausgelesenen Farbinformationen in rgb\_assign\_ent auf die einzelnen Farbausgänge gelegt.

SpriteID	Bezeichnung
0x0	Leeres Feld
0x1	Explosion
0x2	Spieler 1
0x3	Spieler 2
0x4	Kodierung für schwarzen Rand
0xD	Bombe
0xE	Zerstörbarer Block
0xF	Unzerstörbarer Block

Tabelle 4: Sprite-Kodierungen

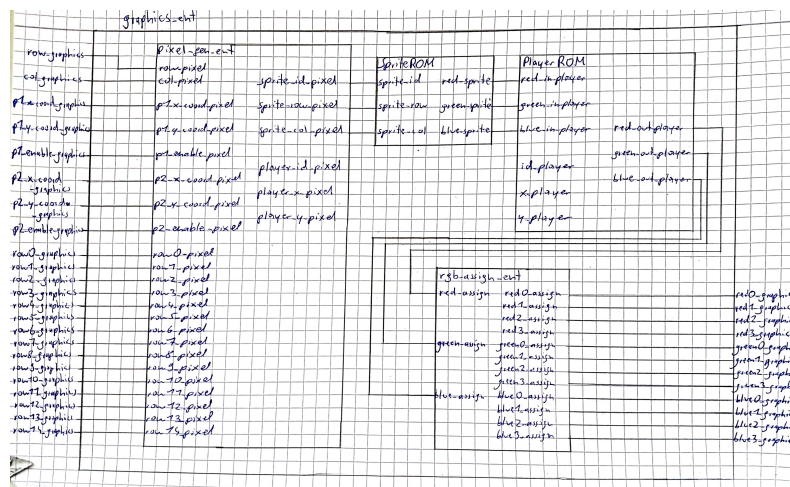


Abbildung 4: Blockdiagramm graphics\_ent

## 6.1. pixel\_gen\_ent

pixel\_gen\_ent bekommt als Eingaben die Informationen über die Spieler, sowie über das Spielfeld. Abhängig von diesen Informationen gibt die Entity aus, auf welche Sprites zugegriffen werden soll und an welcher Stelle.

Die 160 Spalten am linken Rand des Monitors werden bei uns dauerhaft schwarz gefärbt, da wir ein quadratisches Spielfeld wollten, was allerdings bei einer Auflösung von 640x480 nicht funktioniert. Unser tatsächliches Spielfeld ist somit nun 480x480 Pixel groß.

Der erste Spieler hat bei uns den Vorrang vor dem zweiten Spieler, also falls sich beide Spieler übereinander befinden, wird der erste Spieler gezeichnet.

Wir haben unterschiedliche Ausgänge für die Informationen über die Sprites für Spielfeld und Player, um im PlayerROM entscheiden zu können ob wirklich der Spieler oder doch das Spielfeld gezeichnet wird, falls die Grafik des Spielers an der bestimmten Position transparent ist.

## 6.2. Sprites

In den beiden Entities PlayerROM und SpriteROM befinden sich Sprites, die in Abhängigkeit des aktuellen Zustands der Arena, der Spieler und der Bomben RGB-Werte an den VGA-Controller ausgeben. Dazu befinden sich in den beiden Entities PlayerROM und SpriteROM pro Sprite (es existieren Sprites für: Spieler 1, Spieler 2, leerer Block, zerstörbarer Block, unzerstörbarer Block, Bombe, Explosion) ein zweidimensionales konstantes Array (wird synthetisiert als ROM). Diese Arrays sind jeweils  $32 * 384$  Bit groß. Die Größe ergibt sich folgendermaßen: Die Kacheln des Spielfeldes sowie die Quellsprites haben eine Größe von  $32 * 32$  Pixel. Da für jeden Farbkanal des VGA-Ausgangs 4 Bit zur Verfügung stehen haben wir in dem Array den RGB-Wert jedes Pixels mit  $3 * 4$  Bit (also 3 Hex-Werte) kodiert. So kommen 32 Zeilen mit jeweils  $3 * 4 * 32 = 384$  Bit zustande. Die Sprites haben wir aus einem Sprite-Sheet von opengameart ([https://opengameart.org/sites/default/files/DungeonCrawl\\_ProjectUtumnoTileset.png](https://opengameart.org/sites/default/files/DungeonCrawl_ProjectUtumnoTileset.png)) ausgeschnitten und mithilfe eines Java-Programmes, welches im Abgabe-Verzeichnis zu finden ist und im folgenden kurz beschrieben wird, in VHDL-Arrays umgewandelt.

### 6.2.1. SpriteExtractor.java

Das Java-Programm bekommt als Kommandozeilenargumente die Pfade zu den  $32 * 32$  Pixel großen Sprites. Über jedes der Sprites wird pixelweise iteriert und für jeden Pixel der RGB-Wert ausgelesen. Daraus werden die Werte der einzelnen Farbkanäle bestimmt, welche anschließend normiert werden, da auf dem FPGA nur 4 Bit pro Farbkanal nutzbar sind. Die normierten Werte werden in Hex-Character umgewandelt und auf der Konsole

ausgegeben, sodass die RGB-Kanäle jedes Pixels mit 3 Hex-Charactern dargestellt werden. Die Ausgabe erfolgt in der Form von 32 komma-separierten `std_logic_vectors` der Länge 384.

### 6.2.2. SpriteROM

Die Entity SpriteROM wird mit einer Architecture funktional beschrieben. Abhängig von der `sprite_id` wird mittels `sprite_row` und `sprite_col` asynchron auf die verschiedenen Arrays, die Sprites für den leeren/zerstörbaren/unzerstörbaren Block enthalten, zugegriffen. Die `sprite_id` orientiert sich hierbei an den Kodierungen des Spielfeldes (siehe `game_state`, z.B. leerer Block = 0x0). Ist keine gültige `sprite_i` gesetzt (also `sprite_id` > 0x1 und `sprite_i` < 0xD), wird RGB schwarz ausgegeben.

### 6.2.3. PlayerROM

Die Entity PlayerROM ist hinter SpriteROM geschaltet und überschreibt asynchron die RGB-Werte, die von SpriteROM ausgegeben werden, wenn sich im aktuellen Pixel des Bildes ein Spieler befindet. In PlayerROM befinden sich zwei konstante Arrays, die in der gleichen Form wie in SpriteROM die Sprites für die Spieler enthalten. PlayerROM bekommt zum Auslesen der Arrays eine `player_id` (0x2 für Spieler 1, 0x3 für Spieler 2), sowie die x- und y-Position des Spielers im aktuell betrachteten Pixels. Ist die `player_id` gültig, wird der RGB-Wert des entsprechenden Sprites gelesen und ausgegeben. Ist keine gültige `player_id` gesetzt (also `player_id` > 0x3 oder `player_id` < 0x2), wird der RGB-Wert von SpriteROM durchgeschaltet. Hat ein Pixel den (in unseren Sprites speziellen) RGB-Wert 0xEE wird ebenfalls der RGB-Wert von SpriteROM durchgeschaltet. Dies sorgt dafür, dass die Spielfiguren erkennbare Strukturen haben (Spieler sind keine Kacheln) und sich sichtbar vor einem Hintergrund bewegen.

## 6.3. rgb\_assign\_ent

In der Entity `rgb_assign_ent` werden die Farbausgänge für den Monitor gesetzt. Dazu wird bitweise auf die RGB-Eingangsvektoren zugegriffen und die einzelnen Ausgangsbits gesetzt. Dieses Vorgehen am Ende der Bearbeitung erlaubt es uns während den Berechnungen mit drei Vektoren für die Farben zu arbeiten, anstatt immer 12 einzelne Bits zu benutzen.

## 7. sync\_gen\_ent

Die Entity sync\_gen\_ent wird mit einer Architecture strukturell beschrieben durch die Unterkomponenten hsync und vsync. In dieser Entity werden die Signale für den VGA-Controller generiert (also hsync und vsync). Desweiteren werden zum Setzen der Pixel die aktuelle row und column ausgegeben. An dieser Stelle sei auf das VGA-Übungsblatt und den Bericht darüber verwiesen. Wir haben unsere Lösung von dem Übungsblatt für das Projekt übernommen und im Laufe des Projekts nichts an der Entity inklusive Unterkomponenten geändert.

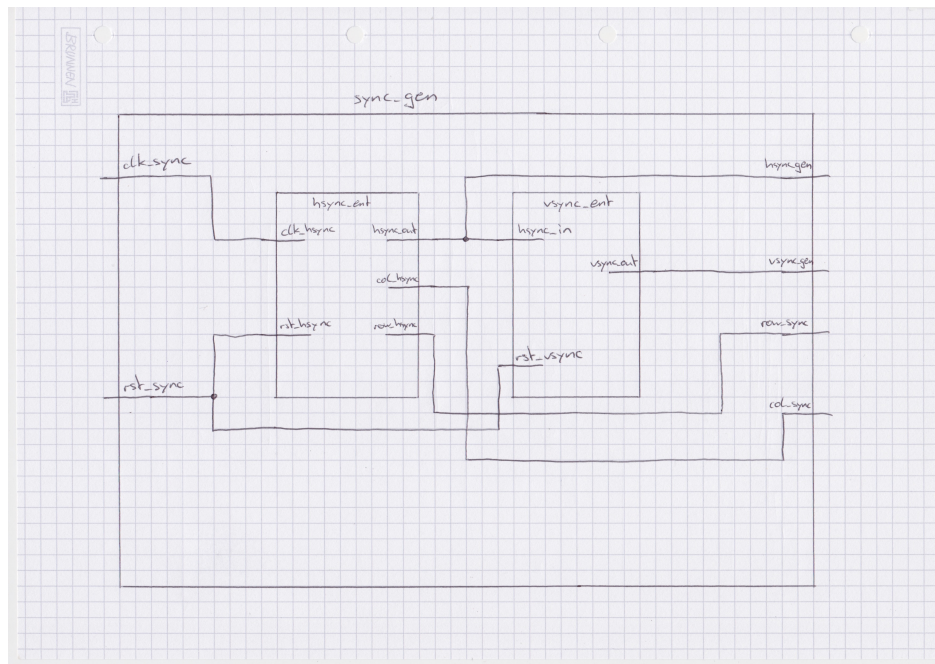


Abbildung 5: Blockdiagramm sync\_gen\_ent

## Teil III. Probleme

### 8. Allgemein

- In einer Version unseres Designs hatten wir ein „congested design“, was sich darin äußerte, dass Place & Route mehrere Stunden dauerte und nicht zu einem Ende

kam. Wir lösten dieses Problem, indem wir unnötige Ports (und somit Leitungen) aus unserem Design löschten. Dies kam vor allen Dingen bei der `player_ent` zum Tragen, da wir hier zu Beginn jedem Player alle 15 Rows übergaben, wobei für die Kollision bei der Bewegung nur maximal drei Rows benötigt werden. Durch die Reduktion der Ports auf diese drei Rows wurde Place & Route deutlich beschleunigt und das Design konnte implementiert werden.

- Hin und wieder (nicht reproduzierbar) passieren gefühlt zufällige, unerwartete Dinge. Zum Beispiel werden eine oder mehrere Rows komplett leer oder es tauchen einzelne schwarze Blöcke auf (für schwarze Blöcke existiert in unserem Code überhaupt keine Logik).

## 9. `game_mechanic_ent`

### 9.1. `game_state_ent`

- Das größte Problem war die korrekte Darstellung der Explosionen. Sobald eine Bombe explodiert ist, wurde in der mittleren Zeile nur eine Explosion dargestellt, obwohl es eigentlich drei Felder mit Explosionen sein sollten. Um die Zeilen zu ändern hatten wir eine eigene Funktion, die die Änderungen vornimmt. Dort wurde immer eine lokale Kopie der entsprechenden Zeile gespeichert, dann die Änderung vorgenommen und anschließend die alte Zeile durch die neue überschrieben. Das Problem war, dass wir diese Funktion für alle fünf Blöcke, die bei einer Explosion geändert werden müssen, nacheinander aufrufen haben und dies somit parallel ausgeführt wird. Bei den Explosionen über und unter der Bombe führte dies zu keinem Problem, allerdings bei denen rechts und links der Bombe. Die Funktion wurde hier also parallel ausgeführt und immer wurde eine lokale Kopie der Zeile gespeichert und später zurückgeschrieben. Sobald die letzte Änderung in einer Zeile vorgenommen wurde, wurden alle Änderungen die durch andere Funktionsaufrufe auf diese Zeile ausgeführt wurden, überschrieben und somit wurde immer nur eine anstatt drei Explosionen dargestellt. Dieses Problem haben wir behoben, indem wir die Funktion nicht fünf Mal aufrufen haben, sondern nur einmal und dieser eine Aufruf sorgt direkt für alle fünf Änderungen.

## 9.2. player\_ent

### 9.2.1. movement\_ent

- Lange Zeit hatten wir ein Problem damit, dass die Spielfiguren in Blöcke hineinglitten konnten, falls sie sich auf zwei Kacheln gleichzeitig befanden und in Richtung des Blockes bewegten. Der Fehler ergab sich wie folgt: Um die Position des rechtesten Pixels eines Spielers herauszufinden (wird für die Kollisionserkennung benötigt), haben wir eine Variable `x_right`, welche wir nach jeder Bewegung in x-Richtung aktualisieren. Diese ergibt sich im Wesentlichen durch Addieren der Spielergröße (Generic) auf die aktuelle x-Position des Spielers. Unser Fehler bestand nun darin, dass wir für die Neuberechnung von `x_right` nach jeder Bewegung in x-Richtung `X_INIT` (Generic, das die initiale x-Position des Spielers enthält) statt `x_int` (Variable, die die aktuelle x-Position des Spielers enthält) verwendeten.
- Zu Beginn bekam `movement_ent` alle 15 Rows des Spielfeldes, was wir gegen Ende noch änderten. Nun werden nur die zur Kollision benötigten Rows übergeben. Dies führte zu Problemen, da wir nun die zu prüfenden Rows anders auswählen mussten. Ein Fehler in unserer diesbezüglichen Logik führte dazu, dass die Bewegung in bestimmte Richtungen nicht mehr möglich war, da wir nun stets alle in Frage kommenden Kacheln überprüften und nicht nur die benötigten. Dieses Problem ließ sich allerdings leicht lösen, indem wir im Falle, dass der Spieler sich auf exakt einer Kachel befindet wir nur eine Kachel zur Kollision überprüfen.
- Am Ende des Praktikums haben wir mit der Bewegung der Spieler noch zwei größere Probleme:
  - In der rechten Hälfte der Arena (ab der neunten Spalte) funktioniert die Bewegung nicht wie von uns erwartet. Von dort ist eine Bewegung nach links nicht mehr möglich und auch die Kollision mit Blöcken funktioniert nicht mehr ordnungsgemäß. Woran das liegt, haben wir nicht mehr herausgefunden, da das Verhalten in der Simulation so nicht vorkommt.

—

## 10. graphics\_ent

### 10.1. pixel\_gen\_ent

- Ein Problem war hier die falsche Berechnung des Offsets für den zweiten Spieler. Hier haben wir vergessen die 160 Pixel des schwarzen Randes zu subtrahieren. Dieser Offset wird für den Zugriff auf den Sprite verwendet.
- Ein weiteres Problem war die Art, wie wir das Spielfeld zeichnen. Ursprünglich haben wir entweder das Spielfeld oder einen Spieler gezeichnet. Als wir jedoch Sprites benutzen wollten, mussten wir dies ändern, um die transparenten Bereiche in dem Sprite des Spielers auch tatsächlich transparent zeichnen zu können. Dafür mussten wir weitere Ausgänge für die Spieler hinzufügen, um Informationen über den Sprite unterhalb des Spielers, sowie über den Sprite des Spielers weitergeben zu können.

### 10.2. Sprites

- Bei der ersten Implementierung geschah der Zugriff auf die ROMs taktsynchron. Dies führte zu einer Ausgabe, die verschmiert und deutlich dunkler als erwartet war. Erklären ist dies damit, dass durch die Taktsynchronität der RGB-Wert eines Pixels aus der Top-Level-Entity zwei Takte zu spät ausgegeben wurde (SpriteROM und PlayerROM verzögern Ausgabe jeweils um einen Takt). Somit wurden am Ende jeder Zeile des Bildes jeweils zwei Takte zu lang RGB-Werte gesetzt, was bei der VGA-Signalgenerierung allerdings nicht erlaubt ist. Gelöst wurde das Problem dadurch, dass SpriteROM und PlayerROM nun asynchron arbeiten.

## 11. sync\_gen\_ent

Ein Problem, das schon bei der Lösung des Übungsblatts aufgetaucht ist, hat sich auch durch das Projekt gezogen. Die VGA-Ausgabe funktioniert nicht an allen Monitoren ordnungsgemäß (es tritt ein Flackern auf). An unserem Test-Monitor hat die VGA-Ausgabe nach einigen Einstellungen jedoch funktioniert.