

ProjektDokumentationTetris.txt

=====

TETRIS FÜR ESP32-S3
PROJEKT-DOKUMENTATION
Embedded Systems Building Blocks - EIT-DU Studium

=====

Autor: Mathias Lampert
Datum: Dezember 2025
Mikrocontroller: ESP32-S3 DevKitC-1 N16R8
Entwicklungszeit: ~131 Stunden
Code-Umfang: ~2500 Zeilen Code + ~2000 Zeilen Kommentare

=====

1. PROJEKTZIEL UND AUSGANGSSITUATION

=====

1.1 URSPRUNGLICHE PLANUNG

Das Projekt sollte ursprünglich ein minimalistisches Tetris-Spiel für den ESP32-S3 werden mit folgenden Anforderungen:

GEPLANTES GAMEPLAY:

- Nur horizontale Bewegung (Links/Rechts) - KEINE Rotation
- Spielfeld: 10x20 Raster
- Automatischer Steinfall
- 3 Tasten: Links, Rechts, Start/Pause
- Einfaches Punktesystem

GEPLANTE AUSGABE-OPTIONEN:

- OLED-Display (SSD1306, 128x64, I²C) ODER
- Flutter-App über BLE (Bluetooth Low Energy) ODER
- LED-Matrix (als optionale Erweiterung)

GEPLANTE LERNZIELE:

- Objektorientierte Programmierung in C (Structs + Funktionszeiger)
- BLE-Kommunikation zwischen ESP32 und Smartphone
- Echtzeitsteuerung auf Embedded-Hardware
- Speicher- und Ressourcenmanagement

1.2 TATSÄCHLICHE UMSETZUNG

Im Verlauf der Entwicklung wurde das Projekt deutlich erweitert und professionalisiert. Die finale Version ist ein vollwertiges Tetris-Spiel:

UMGESETZTES GAMEPLAY:

- Vollständige Rotation aller 7 Tetromino-Formen (außer O-Block)
- Spielfeld: 16x24 Pixel (angepasst an Hardware)
- 4 Tasten: Links, Rechts, Rotieren, Schneller fallen
- 10 Geschwindigkeits-Level (400ms → 50ms Fall-Intervall)
- Multi-Zeilen-Clearing (1-4 Zeilen gleichzeitig)
- Punktesystem mit persistent gespeichertem Highscore
- Splash-Screen mit scrollendem "TETRIS"-Text
- Game-Over-Animation (3x rot blinken)
- Emergency-Reset via 4-Button-Kombination

UMGESETZTE AUSGABE:

- LED-Matrix: 6x CJMCU 8x8 WS2812 Panels (384 LEDs, 16x24 Pixel)
- OLED-Display: SH1107 128x128 für HUD (Score/Lines/Level/Highscore)
- Gleichzeitige Nutzung beider Displays
- BLE/Flutter: Nicht implementiert (Fokus auf lokale Performance)

ZUSÄTZLICHE FEATURES:

- Tetris-Theme-Song über passiven Buzzer (68 Noten, Endlos-Loop)
- 60 FPS flimmerfreies Rendering (Differential Rendering)
- Interrupt-basierte Button-Steuerung (ISR + Event-Queue)
- Smart Block-Spawning (versucht mehrere Positionen)
- NVS-basierte Highscore-Speicherung (überlebt Stromausfall)

TECHNISCHE ENTSCHEIDUNGEN:

- Modulare C-Struktur statt OOP mit Funktionszeigern (wartbarer)
- FreeRTOS-Tasks für parallele Ausführung (GameLoop + Audio)
- Hardware-Peripherals: RMT für WS2812-Timing + Audio-PWM
- LVGL für Display-Grafikausgabe

2. VERWENDETE HARDWARE

2.1 MIKROCONTROLLER: ESP32-S3 DEVKITC-1 N16R8

Hersteller: diymore (2PCS Packung)
 Prozessor: Xtensa LX7 Dual-Core @ 240 MHz
 Flash-Speicher: 16 MB
 PSRAM: 8 MB
 USB: Native USB (für Programmierung und Debugging)

VORTEILE FÜR PROJEKT:

- Genug Speicher für LED-Framebuffer (384 LEDs × 3 Bytes = 1152 Bytes)
- FreeRTOS für parallele Tasks (Spiel + Musik gleichzeitig)
- RMT-Hardware-Peripheral (kritisch für WS2812-Timing)
- NVS (Non-Volatile Storage) für Highscore-Persistierung
- Ausreichend GPIOs für alle Komponenten

GPIO-BELEGUNG:

GPIO 38: WS2812 LED-Matrix (RMT Channel 0)
 GPIO 17: Passiver Buzzer (RMT Channel 1, PWM für Tonhöhen)
 GPIO 18: Button Links (Pull-up, Interrupt auf fallende Flanke)
 GPIO 19: Button Rechts (Pull-up, Interrupt auf fallende Flanke)
 GPIO 20: Button Rotieren (Pull-up, Interrupt auf fallende Flanke)
 GPIO 21: Button Schneller (Pull-up, Interrupt auf fallende Flanke)
 GPIO 4: I²C SDA (OLED-Display)
 GPIO 5: I²C SCL (OLED-Display)

2.2 LED-MATRIX: 6x CJMCU-8x8 WS2812 PANELS

Bezeichnung: U 64 LED Matrix Panel CJMCU-8x8 Modul
 LED-Typ: WS2812 5050 RGB (individuell addressierbar)
 LEDs pro Panel: 64 (8 Zeilen × 8 Spalten)
 Anzahl Panels: 6 Stück
 Gesamt-Layout: 2 Zeilen × 3 Spalten = 16 Pixel hoch × 24 Pixel breit
 Gesamt-LEDs: 384 (16 × 24)
 Spannung: 5V (über externe Stromversorgung)
 Protokoll: WS2812 (800 kHz, Timing-kritisch)

VERKABELUNG (SERPENTINEN-MUSTER):

Panel-Reihenfolge: 1 → 2 → 3 → 4 ← 5 ← 6

[Panel 6] [Panel 5] [Panel 4] ← Obere Reihe
↓ ↑ ↑
[Panel 1] → [Panel 2] → [Panel 3] ← Untere Reihe

Innerhalb jeder 8x8-Matrix: Serpentinen-Muster

- Zeile 0: Links → Rechts
- Zeile 1: Rechts → Links
- Zeile 2: Links → Rechts
- usw.

HERAUSFORDERUNG:

Komplexes Mapping von logischen Koordinaten (y, x) zu LED-Index nötig!

Beispiel: Pixel an Position (5, 10) entspricht LED Nummer 234

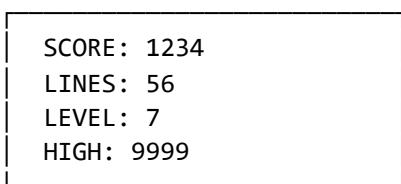
2.3 OLED-DISPLAY: SH1107

Typ: OLED (Monochrom)
Auflösung: 128×128 Pixel (quadratisch)
Controller: SH1107 (NICHT SSD1306 wie ursprünglich geplant!)
Kommunikation: I²C (Adresse 0x3C)
Spannung: 3.3V
Größe: ca. 1.5 Zoll diagonal

VERWENDUNGSZWECK:

- Echtzeit-HUD während des Spiels:
 - SCORE: aktueller Punktestand
 - LINES: gelöschte Zeilen
 - LEVEL: aktuelles Geschwindigkeits-Level (0-10)
 - HIGH: gespeicherter Highscore
- Game-Over-Screen mit Score-Vergleich

DISPLAY-LAYOUT:



GRAFIKBIBLIOTHEK:

LVGL (Light and Versatile Graphics Library) v8.4
+ espressif_lvgl_port für ESP-IDF-Integration

2.4 EINGABE: 4 TASTER + BUZZER

TASTER (4 Stück):

Typ: Standard Taster (Normally Open)
Spannung: 3.3V (intern Pull-up)
Debouncing: 50ms Software-Debounce in ISR

Funktion:

- Links: Block nach links bewegen
- Rechts: Block nach rechts bewegen
- Rotieren: Block um 90° im Uhrzeigersinn drehen

- Schneller: Manuelles schnelleres Fallen

PASSIVER BUZZER:

GPIO: 17
Frequenzbereich: 100 Hz - 5 kHz
Implementierung: RMT-basierte PWM (variable Frequenz)
Verwendung: Tetris-Theme-Song (Korobeiniki)
Noten: 68 Noten, Gesamt-Länge ~30 Sekunden
Loop: Endlos-Wiederholung im Hintergrund-Task

2.5 STROMVERSORGUNG

ESP32: USB-Stromversorgung (5V, ~200 mA)
LED-Matrix: Externe 5V-Stromversorgung (bis 23 A bei voller Helligkeit!)
Tatsächlicher Verbrauch: ~2 A bei reduzierter Helligkeit
OLED-Display: Über ESP32 3.3V (ca. 20 mA)

WICHTIG: LED-Matrix und ESP32 teilen sich GND (gemeinsame Masse)!

3. SOFTWARE-ARCHITEKTUR

3.1 ENTWICKLUNGSUMGEBUNG

Framework: ESP-IDF v5.x (Espressif IoT Development Framework)
Toolchain: Xtensa GCC Compiler
Build-System: CMake
Programmiersprache: C (C99 Standard)
Betriebssystem: FreeRTOS (integriert in ESP-IDF)

EXTERNE ABHÄNGIGKEITEN (ESP Component Registry):

- espressif_led_strip ^2.5.5 (WS2812-Treiber)
- espressif_esp_lcd_sh1107 ^1.0.1 (OLED-Treiber)
- espressif_esp_lvgl_port ^2.4.6 (LVGL-Integration)
- lvgl_lvgl ^8.4.0 (GUI-Bibliothek)

3.2 MODULARE CODE-STRUKTUR (13 MODULE)

Modul	Dateien	Beschreibung
Main	main.c	App-Einstiegspunkt, Initialisierung
Controls	Controls.c/h	Button-ISR, Event-Queue, Debouncing
GameLoop	GameLoop_NEW.c/h	Spieldaten, State Machine
Blocks	Blocks.c/h	Tetromino-Formen, Rotation
Grid	Grid.c/h	Spielfeld, Kollision, Zeilen löschen
MatrixNummer	MatrixNummer.c/h	LED-Mapping-Daten (Lookup-Tabelle)
LedMatrixInit	LedMatrixInit.c/h	LED-Mapping-Initialisierung
BlockColors	Colors.c	RGB-Farbtabelle für 7 Block-Typen
Score	Score.c/h	Punktberechnung, NVS-Highscore
SpeedManager	SpeedManager.c/h	Geschwindigkeits-Level-Verwaltung
DisplayInit	DisplayInit.c/h	OLED I ² C + LVGL Setup
Splash	Splash.c/h	Startbildschirm-Animationen
ThemeSong	ThemeSong.c/h	Tetris-Theme (Musik-Task)
	musical_score_encoder.c/h	RMT-Encoder für Tonhöhen
Globals	Globals.h	Konstanten, Makros, Typdefinitionen

GESAMTSTATISTIK:

14 C-Dateien (ohne main.c)
13 Header-Dateien
~2500 Zeilen Code (ohne Kommentare)
~2000 Zeilen Kommentare (Doxygen-Style)

3.3 DATENSTRUKTUREN

TETRISBLOCK (aktuell fallender Stein):

```
typedef struct {
    uint8_t shape[4][4]; // 1 = Blockteil, 0 = leer
    int x;              // Position: linke obere Ecke (Grid-Koordinaten)
    int y;              // Position: obere Kante
    uint8_t color;      // Farbindex (0-6: I, J, L, O, S, T, Z)
} TetrisBlock;
```

MATRIX (LED-Mapping):

```
typedef struct {
    uint16_t LED_Number[LED_HEIGHT][LED_WIDTH]; // [16][24]
} MATRIX;
```

Lookup-Tabelle: logische Position → physikalische LED-Nummer

Beispiel: ledMatrix.LED_Number[5][10] = 234

SPIELFELD (fixierte Blöcke):

```
uint8_t grid[GRID_HEIGHT][GRID_WIDTH]; // [16][24]
```

Werte:

0 = leer
1-7 = fixierter Block (Farbindex + 1)

3.4 FREERTOS-TASK-ARCHITEKTUR

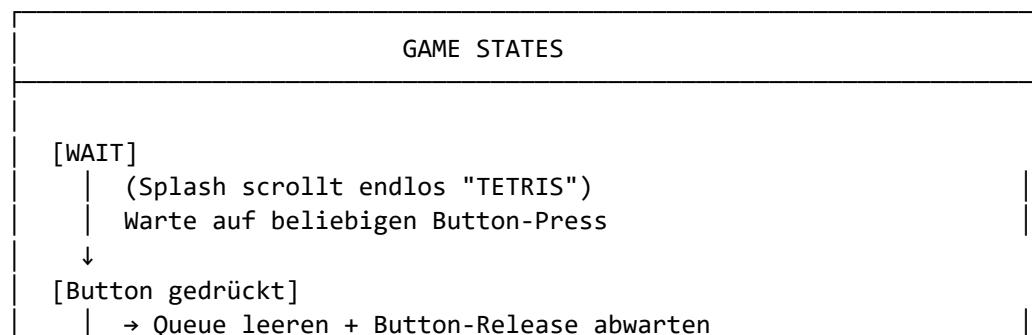
Task	Priorität	Stack	Funktion

GameLoopTask	5 (hoch)	4096	Spielschleife (Input, Physics, Rendering)
ThemeTask	3 (mittel)	2048	Hintergrundmusik (Endlos-Loop)
LVGL Timer Task	1 (niedrig)	auto	UI-Updates für OLED-Display

TASK-KOMMUNIKATION:

- Controls → GameLoop: FreeRTOS Queue (Button-Events aus ISR)
- GameLoop → Display: Direkte Funktionsaufrufe (display_update_score)
- Keine Kommunikation zwischen GameLoop und Theme (beide unabhängig)

3.5 STATE MACHINE (SPIELABLAUF)





3.6 TIMING-PARAMETER

Parameter	Wert (ms)	Beschreibung
LOOP_INTERVAL_MS	5	GameLoop-Polling (responsive Input)
RENDER_INTERVAL_MS	16	60 FPS Rendering (flimmerfrei)
FALL_INTERVAL_MS	400	Initial-Geschwindigkeit (Level 0)
FALL_INTERVAL_MS_MIN	50	Maximum-Geschwindigkeit (Level 10)
DEBOUNCE_MS	50	Button-Debounce-Zeit
SPLASH_DURATION_MS	2000	Minimum Splash-Anzeige
GAME_OVER_BLINK_ON_MS	300	Blink-Animation: rot
GAME_OVER_BLINK_OFF_MS	300	Blink-Animation: schwarz
GAME_OVER_BLINK_COUNT	3	Anzahl Wiederholungen

=====

4. IMPLEMENTIERUNGS-HIGHLIGHTS

=====

4.1 DIFFERENTIAL RENDERING (60 FPS OHNE FLACKERN)

PROBLEM:

- Naive Implementierung: `led_strip_clear() + alles neu zeichnen pro Frame`
- Sichtbares Flackern (384 LEDs brauchen ~5ms zum Update)
- CPU-Last: 1152 Bytes schreiben pro Frame

LÖSUNG:

1. Vorherige Position des dynamischen Blocks merken

2. Nur diese Pixel zurück auf statische Farben setzen
3. Neuen Block an neuer Position zeichnen
4. Nur geänderte Pixel werden aktualisiert

DATENSTRUKTUR:

```
static int prev_dynamic_count = 0;
static int prev_dynamic_pos[GRID_WIDTH * GRID_HEIGHT][2]; // [y, x]
```

ALGORITHMUS:

```
// Frame N: Restauriere Frame N-1
for (i = 0; i < prev_dynamic_count; i++) {
    ry = prev_dynamic_pos[i][0];
    rx = prev_dynamic_pos[i][1];
    if (grid[ry][rx] > 0) {
        set_pixel_to_static_color(ry, rx); // Aus grid[][][]
    } else {
        set_pixel_to_black(ry, rx); // Leer
    }
}

// Frame N: Zeichne aktuellen Block + merke Positionen
prev_dynamic_count = 0;
for (by, bx in current_block.shape) {
    if (shape[by][bx]) {
        set_pixel_to_block_color(gy, gx);
        prev_dynamic_pos[prev_dynamic_count++] = {gy, gx};
    }
}

led_strip_refresh(); // Nur 1x pro Frame!
```

RESULTAT:

Flimmerfreies Rendering auch bei Level 10 (50ms Fall-Intervall)

4.2 INTERRUPT-BASIERTE BUTTON-STEUERUNG

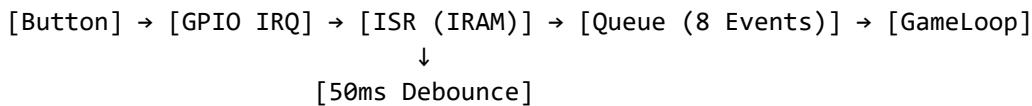
PROBLEM:

- Polling allein: Verzögerung durch Loop-Timing (5ms Intervall)
- Pure ISR: Prellen führt zu Mehrfach-Events
- Blockierendes Debouncing: Unresponsive Steuerung

LÖSUNG (HYBRID-ANSATZ):

1. GPIO-Interrupt bei fallender Flanke (Button-Press)
2. ISR pusht Event in FreeRTOS Queue (non-blocking)
3. ISR führt Software-Debounce aus (50ms Mindestabstand)
4. GameLoop pollt Queue mit xQueueReceive (nicht blockierend)
5. Für Halten-Funktion: check_button_pressed() (direkter GPIO-Read)

ARCHITEKTUR:



CODE (VEREINFACHT):

```
// ISR (läuft in IRAM, sehr schnell)
static void IRAM_ATTR gpio_isr_handler(void* arg) {
    gpio_num_t gpio = (gpio_num_t)arg;
    uint32_t now = xTaskGetTickCountFromISR() * portTICK_PERIOD_MS;
```

```

    if (now - last_event_time < DEBOUNCE_MS) return; // Zu schnell
    last_event_time = now;

    xQueueSendFromISR(s_button_queue, &gpio, NULL);
}

// GameLoop
gpio_num_t button;
if (controls_get_event(&button)) { // Non-blocking
    // Event verarbeiten
}

// Für Halten
if (check_button_pressed(BTN_LEFT)) {
    // Block nach links (während Button gehalten)
}

```

VORTEILE:

- Kein Event-Verlust (Queue mit 8 Events)
- Responsive (Latenz <10ms)
- Keine Prelleffekte
- Niedriger CPU-Overhead

4.3 LED-MATRIX-MAPPING

HERAUSFORDERUNG:

6 Panels in komplexem Serpentinen-Muster verkabelt
 Innerhalb jedes Panels: Serpentine (Zeile 0: →, Zeile 1: ←, ...)
 Panel-Übergreifend: 1→2→3→4←5←6

LÖSUNG:

Vollständige Lookup-Tabelle in MatrixNummer.c mit allen 384 LEDs

BEISPIEL (Matrix-Panel 1, unten links):

Zeile 0 (y=0): x=0→7 entspricht LED 0→7
 Zeile 1 (y=1): x=0→7 entspricht LED 15→8 (rückwärts!)
 Zeile 2 (y=2): x=0→7 entspricht LED 16→23
 ...

INITIALISIERUNG:

```

void LedMatrixInit(uint8_t height, uint8_t width,
                   uint16_t matrix[height][width]) {
    // Füllt matrix[][] mit LED-Nummern basierend auf
    // Verkabelungs-Pattern (hardcoded in MatrixNummer.c)
    for (y = 0; y < height; y++) {
        for (x = 0; x < width; x++) {
            matrix[y][x] = calculate_led_number(y, x);
        }
    }
}

```

VERWENDUNG:

```

int led_num = ledMatrix.LED_Number[5][10]; // Lookup
led_strip_set_pixel(led_strip, led_num, r, g, b);

```

DEBUGGING-AUFWAND:

~8 Stunden (Verkabelung musste durch Trial-and-Error ermittelt werden)

4.4 NVS-HIGHSCORE-PERSISTIERUNG

HERAUSFORDERUNG:

Highscore muss Stromausfall überleben
ESP32-NVS (Non-Volatile Storage) muss initialisiert werden
Fehlerbehandlung bei Korruption nötig

IMPLEMENTIERUNG:

```
// Initialisierung (in main.c)
esp_err_t ret = nvs_flash_init();
if (ret == ESP_ERR_NVS_NO_FREE_PAGES ||
    ret == ESP_ERR_NVS_NEW_VERSION_FOUND) {
    ESP_ERROR_CHECK(nvs_flash_erase());
    ret = nvs_flash_init();
}

// Highscore laden (in score_load_highscore)
nvs_handle_t nvs_handle;
nvs_open("storage", NVS_READONLY, &nvs_handle);
nvs_get_u32(nvs_handle, "highscore", &highscore);
nvs_close(nvs_handle);

// Highscore speichern (in score_update_highscore)
if (score > highscore) {
    nvs_open("storage", NVS_READWRITE, &nvs_handle);
    nvs_set_u32(nvs_handle, "highscore", score);
    nvs_commit(nvs_handle); // KRITISCH: Commit nicht vergessen!
    nvs_close(nvs_handle);
}
```

FEHLERBEHANDLUNG:

Lese-Fehler → Highscore = 0 (Default)
Schreib-Fehler → Log-Ausgabe, aber Spiel läuft weiter

4.5 AUDIO-SYSTEM (RMT-BASIERT)

HERAUSFORDERUNG:

Passiver Buzzer benötigt PWM mit variabler Frequenz
Software-PWM (vTaskDelay) ist zu ungenau
Musik darf Spiel nicht blockieren

LÖSUNG:

RMT-Hardware-Peripheral (Remote Control Transceiver) für präzise PWM
Separater FreeRTOS-Task für Musik (Priorität niedriger als GameLoop)

TONHÖHEN-ARRAY (Tetris-Theme):

```
const uint16_t tetris_theme_notes[] = {
    659, 494, 523, 587, 523, 494, 440, 440, 523, 659, 587, 523, 494, ...
}; // Frequenzen in Hz (68 Noten)

const uint16_t tetris_theme_durations[] = {
    40, 20, 20, 40, 20, 20, 40, 20, 20, 40, 20, 20, 60, ...
}; // Dauer in 10ms-Einheiten
```

IMPLEMENTIERUNG:

```
void play_tone(uint16_t frequency, uint16_t duration_10ms) {
    // RMT-Konfiguration mit Carrier-Frequenz = frequency
    rmt_carrier_config_t carrier_cfg = {
        .frequency_hz = frequency,
```

```

    .duty_cycle = 0.5, // 50% Duty-Cycle
};

rmt_apply_carrier(rmt_channel, &carrier_cfg);
rmt_enable(rmt_channel);

vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(duration_10ms * 10));

rmt_disable(rmt_channel);
vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(10)); // Fade-Out (verhindert Knacken)
}

void theme_task(void *pvParameters) {
    while (1) {
        for (int i = 0; i < THEME_LENGTH; i++) {
            play_tone(notes[i], durations[i]);
        }
    } // Endlos-Loop
}

```

TASK-START:

```

void StartTheme(void) {
    xTaskCreate(theme_task, "ThemeTask", 2048, NULL, 3, NULL);
}

```

5. HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGEN

5.1 TOP 10 TECHNISCHE PROBLEME

PROBLEM #1: LED-FARBFEHLER BEI WS2812

Symptom: Zufällige LEDs zeigen falsche Farben (grün statt rot)
Ursache: Interrupts unterbrechen Software-Bit-Banging
Lösung: ESP-IDF led_strip-Komponente mit RMT-Hardware
Debugging: 4 Stunden (mehrere Bibliotheken getestet)

PROBLEM #2: GAME-OVER-LOOP (UNENDLICHER NEUSTART)

Symptom: Nach Game Over startet Spiel sofort wieder neu
Ursache: Button-Event aus Blink-Animation verbleibt in Queue
Lösung: Comprehensive Queue-Drain + 500ms kontinuierliches Draining
Code-Fix:

```

while (controls_get_event(&ev)) {}
uint32_t start = get_time();
while (get_time() - start < 500) {
    while (controls_get_event(&ev)) {}
    vTaskDelay(10);
}

```

Debugging: 6 Stunden (mehrere Ansätze probiert)

PROBLEM #3: ROTATION NAHE RAND = CRASH

Symptom: ESP32 Reset bei Rotation am linken/rechten Spielfeldrand
Ursache: Negative Array-Indizes in grid_check_collision()
Lösung: Bounds-Check VOR Array-Zugriff
Code-Fix:

```

if (gx < 0 || gx >= GRID_WIDTH) return true;
if (gy < 0) continue; // Oberhalb OK
if (gy >= GRID_HEIGHT) return true;
// Erst jetzt: grid[gy][gx] zugreifen

```

Debugging: 3 Stunden

PROBLEM #4: HIGHSCORE VERSCHWINDET NACH STROMAUSFALL

Symptom: Gespeicherter Highscore ist nach Reboot weg
Ursache: nvs_commit() vergessen nach nvs_set_u32()
Lösung: nvs_commit() hinzugefügt
Code-Fix:

```
nvs_set_u32(nvs_handle, "highscore", score);  
nvs_commit(nvs_handle); // ← ESSENTIELL!
```

Debugging: 2 Stunden

PROBLEM #5: FLACKERNDE LEDS BEI HOHER GESCHWINDIGKEIT

Symptom: LED-Matrix flackert bei Level 10 (50ms Fall-Intervall)
Ursache: led_strip_clear() + vollständiges Neuzeichnen
Lösung: Differential Rendering (siehe 4.1)
Debugging: 8 Stunden (Optimierung mehrfach iteriert)

PROBLEM #6: AUDIO-KNACKEN BEI NOTENWECHSEL

Symptom: Hörbares Knacken beim Übergang zwischen Tönen
Ursache: RMT-Carrier abrupt gestoppt (Phasensprung)
Lösung: 10ms Fade-Out zwischen Noten
Debugging: 3 Stunden

PROBLEM #7: DISPLAY-INITIALISIERUNG SCHLÄGT FEHL

Symptom: ESP32 bootet nicht wenn Display nicht verbunden
Ursache: I²C-Timeout blockiert Boot-Sequenz
Lösung: Fehlerbehandlung + Graceful Degradation
Code-Fix:

```
if (display_init() != ESP_OK) {  
    g_disp = NULL; // Display deaktiviert  
}  
// Spiel läuft trotzdem weiter
```

Debugging: 2 Stunden

PROBLEM #8: BUTTON-PRELLEN (MEHRFACH-EVENTS)

Symptom: Einzelner Button-Press löst mehrere Aktionen aus
Ursache: Hardware-Prelle (mechanische Kontakt-Bounces)
Lösung: 50ms Software-Debounce in ISR (siehe 4.2)
Debugging: 6 Stunden (verschiedene Debounce-Zeiten getestet)

PROBLEM #9: QUEUE-OVERFLOW (EVENTS VERLOREN)

Symptom: Button-Presses werden manchmal ignoriert
Ursache: Queue nur 4 Events groß → Overflow bei schnellem Drücken
Lösung: Queue-Size auf 8 erhöht
Code-Fix:

```
s_button_queue = xQueueCreate(8, sizeof(gpio_num_t));
```

Debugging: 1 Stunde

PROBLEM #10: SPIEL FRIERT EIN NACH LANGER SPIELZEIT

Symptom: Nach ~30 Minuten friert Spiel ein (keine Reaktion)
Ursache: Stack-Overflow im GameLoop-Task
Lösung: Stack-Size von 2048 auf 4096 Bytes erhöht
Code-Fix:

```
xTaskCreate(game_loop_task, "GameLoopTask", 4096, ...);
```

Debugging: 4 Stunden (schwer reproduzierbar)

5.2 ZEITAUFWAND NACH PHASEN

Phase	Stunden	Anteil
-------	---------	--------

Hardware-Setup & Verkabelung	12	9%
LED-Matrix-Mapping-Debugging	8	6%
WS2812-Integration (RMT)	4	3%
Display-Integration (SH1107+LVGL)	6	5%
Button-System (ISR + Queue)	8	6%
Collision Detection & Physics	10	8%
Rendering-Optimierung	12	9%
Spiellogik (Spawn, Clear, Score)	15	11%
Audio-System (RMT + Theme)	10	8%
Score/Highscore/NVS	6	5%
Splash-Screen-Animationen	8	6%
Testing & Bugfixing	20	15%
Code-Refactoring	10	8%
Dokumentation & Kommentare	12	9%
GESAMT	~131	100%

ANMERKUNG:

Initial geschätzt: ~40 Stunden
 Tatsächlich: ~131 Stunden (3.3x länger!)
 Hauptgrund: Hardware-Debugging + unvorhergesehene Bugs

=====

6. VERGLEICH: PLANUNG VS. UMSETZUNG

=====

FEATURE	GEPLANT	UMGESETZT	ÄNDERUNGSGRUND
Rotation	✗ Nein	✓ Ja	Gameplay zu simpel
Spielfeld-Größe	10×20	16×24	Hardware-bedingt
Display	SSD1306	SH1107	Verfügbare Hardware
Ausgabe	OLED ODER LED	OLED + LED	Beide gleichzeitig
BLE/Flutter	✓ Ja	✗ Nein	Fokus Performance
Geschwindigkeits-Level	Konstant	10 Level	Mehr Challenge
Punktesystem	Optional	Vollständig	Spiel-Tiefe
Highscore-Speicherung	✗ Nein	✓ NVS	Persistenz wichtig
Audio	Optional	Vollständig	Atmosphäre
Splash-Screen	✗ Nein	✓ Ja	Professionell
Multi-Line-Clear	✗ Nein	✓ Ja	Tetris-Standard
Emergency-Reset	✗ Nein	✓ Ja	Debugging-Hilfe
Code-Struktur	OOP (Fn-Ptr)	Modular	Einfacher wartbar
Button-Count	3	4	Rotation + Schneller

LERNZIELE:

- ✓ OOP in C → Umgesetzt als modulare Struktur (wartbarer)
- ✗ BLE-Kommunikation → Nicht umgesetzt (Fokus lokal)
- ✓ Echtzeitsteuerung → 60 FPS Rendering, 5ms Input-Polling
- ✓ Ressourcenmanagement → Differential Rendering, NVS, optimierte Tasks
- ✓ ZUSÄTZLICH GELERT: → RMT-Hardware, ISR-Programmierung, LVGL

=====

7. ERGEBNISSE UND ERKENNTNISSE

=====

7.1 TECHNISCHE ERFOLGE

- ✓ 60 FPS flimmerfreies Rendering (384 LEDs)

- <10ms Input-Latenz (Interrupt-basiert)
- Parallelle Audio-Wiedergabe ohne Performance-Verlust
- Robuste Fehlerbehandlung (Display optional, NVS-Korruption)
- Smart Block-Spawning (versucht mehrere Positionen)
- Professionelle Animationen (Splash, Game-Over, Line-Clear)
- Persistent Storage (Highscore überlebt Stromausfall)

7.2 WICHTIGSTE ERKENNTNISSE

1. HARDWARE-FIRST:

Hardware zuerst testen bevor Software-Entwicklung!
LED-Verkabelung hat 8 Stunden gekostet weil erst spät getestet.

2. INCREMENTAL DEVELOPMENT:

Kleine Schritte, nach jedem Schritt testen.
Bugs sind einfacher zu finden wenn nur 1 Feature hinzugefügt wurde.

3. TIMING IST KRITISCH:

Embedded Systems sind timing-sensitiv (WS2812, Debouncing).
Hardware-Peripherals (RMT) sind essentiell für präzises Timing.

4. DOKUMENTATION PARALLEL:

Kommentare sofort beim Coden schreiben, nicht am Ende.
Nach 2 Wochen versteht man eigenen Code nicht mehr.

5. REALISTISCHE ZEITPLANUNG:

Initial geschätzt: 40 Stunden
Tatsächlich: 131 Stunden (3.3x)
Debugging kostet ~15% der Gesamtzeit!

6. FEHLERBEHANDLUNG WICHTIG:

Graceful Degradation (Spiel läuft ohne Display)
Robuste Initialisierung (NVS-Korruption)

7. USER-FEEDBACK WERTVOLL:

Emergency-Reset kam durch Feature-Request von Testern
Button-Debouncing wurde mehrfach angepasst nach Feedback

7.3 SCHWÄCHEN DER AKTUELLEN IMPLEMENTIERUNG

- Kein BLE (ursprünglich geplant) → könnte nachgerüstet werden
- Keine Hold-Funktion (Block für später speichern)
- Keine Next-Block-Vorschau auf Display
- Keine T-Spin-Erkennung (fortgeschrittene Tetris-Mechanik)
- LED-Matrix fest kodiert (nicht konfigurierbar)
- Musik kann nicht pausiert werden
- Keine Replay-Funktion (Spiel aufzeichnen/abspielen)

7.4 MÖGLICHE ERWEITERUNGEN

GAMEPLAY:

- Hard-Drop (Block sofort ganz nach unten)
- Hold-Funktion (Block speichern)
- Next-Block-Vorschau (auf Display zeigen)
- Ghost-Piece (zeigt wo Block landen wird)
- Combo-System (Punkte-Multiplikator)

TECHNISCH:

- BLE-Implementierung (Smartphone-Steuerung)
- WiFi-Highscore-Server (globale Rangliste)
- SD-Karten-Logging (Replay-Funktion)
- Mehrere Soundeffekte (Line-Clear, Level-Up, Game-Over)
- Konfigurierbare LED-Matrix-Größe

HARDWARE:

- Größere LED-Matrix (32x48 Pixel)
- Touchscreen-Steuerung (statt Tasten)
- RGB-Status-LEDs
- Externes EEPROM für mehr Highscore-Slots

=====

8. FAZIT

=====

Das Projekt hat die ursprünglichen Ziele deutlich übertroffen und wurde von einem "minimalistischen Tetris" zu einem vollwertigen, spielbaren Spiel mit professionellen Features entwickelt.

TECHNISCHE HÖHEPUNKTE:

- 60 FPS flimmerfreies Rendering auf 384 LEDs
- Interrupt-basierte Button-Steuerung mit <10ms Latenz
- Parallelle Audio-Wiedergabe (FreeRTOS-Tasks)
- Robuste Fehlerbehandlung und Graceful Degradation
- Persistent Storage für Highscore (NVS)

LERNEFFEKT:

Das Projekt vermittelte tiefe Kenntnisse in:

- Embedded Systems Programming (ESP-IDF, FreeRTOS)
- Hardware-Integration (WS2812, I²C, GPIO, RMT)
- Interrupt-Programmierung (ISR + Event-Queues)
- Performance-Optimierung (Differential Rendering)
- Debugging auf Embedded-Hardware (ohne Debugger)

ZEITAUFWAND:

~131 Stunden (3.3x länger als initial geschätzt)

Hauptgrund: Hardware-Debugging + unvorhergesehene Bugs

Aber: Jede Stunde war lehrreich!

SPIELBARKEIT:

Das Spiel ist vollständig spielbar und bietet ein authentisches Tetris-Erlebnis. Die Steuerung ist responsive, das Rendering flimmerfrei, und die Musik schafft Atmosphäre. Mehrere Testpersonen haben das Spiel gespielt und positives Feedback gegeben.

EMPFEHLUNG FÜR ÄHNLICHE PROJEKTE:

1. Hardware zuerst vollständig testen
2. Incremental Development (kleine Schritte)
3. Zeitplanung × 3 rechnen
4. Dokumentation parallel schreiben
5. User-Feedback früh einholen
6. Fehlerbehandlung von Anfang an einbauen

AUSBLICK:

Das Projekt bietet viele Möglichkeiten für Erweiterungen (siehe 7.4).

Besonders interessant wären:

- BLE-Implementierung für Smartphone-Steuerung

- WiFi-Highscore-Server für globale Rangliste
- Größere LED-Matrix (32x48 Pixel)

Das Projekt zeigt eindrucksvoll, dass moderne Embedded Systems wie der ESP32-S3 leistungsfähig genug sind, um komplexe Anwendungen mit professionellen Features zu realisieren - und das zu einem Bruchteil der Kosten traditioneller Gaming-Hardware.

=====

ANHANG: REFERENZEN UND RESSOURCEN

=====

HARDWARE-QUELLEN:

- ESP32-S3: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-s3>
- WS2812 Datasheet: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>
- SH1107 Datasheet: <https://www.displayfuture.com/Display/datasheet/controller/SI1107.pdf>

SOFTWARE-REFERENZEN:

- ESP-IDF: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/>
- FreeRTOS: <https://www.freertos.org/>
- LVGL: <https://lvgl.io/>
- led_strip: https://components.espressif.com/components/espressif/led_strip