

Bachelorarbeit

---

# Explizite Berechnung der Levelt-Turritin-Zerlegung für spezielle D-Moduln

---

vorgelegt von Maximilian Huber

am Institut für Mathematik  
der Universität Augsburg

betreut durch Prof. Dr. Marco Hien

abgegeben am 04.07.2013

stand: 16. Mai 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>v</b>
<b>0 Mathematische Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1 Moduln über <math>\mathcal{D}_k</math></b>	<b>5</b>
1.1 Weyl-Algebra und der Ring $\mathcal{D}_k$ . . . . .	6
1.1.1 Alternative Definition / Sichtweise . . . . .	8
1.2 (Links) $\mathcal{D}$ -Moduln . . . . .	9
1.2.1 Holonome $\mathcal{D}$ -Moduln . . . . .	9
1.3 Lokalisierung von $\mathbb{C}\{x\}$ -Moduln . . . . .	10
1.4 Lokalisierung eines $\mathcal{D}$ -Moduls . . . . .	11
<b>2 Meromorphe Zusammenhänge</b>	<b>12</b>
2.1 Systeme von ODEs und Meromorphe Zusammenhänge . . . . .	12
2.1.1 Meromorphe Zusammenhänge . . . . .	13
2.2 Eigenschaften / Äquivalenz zu holonomen lokalisierten $\mathcal{D}$ -Moduln . . . . .	14
2.3 Newton Polygon . . . . .	18
2.3.1 Die Filtrierung ${}^\ell V\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ und das $\ell$ -Symbol . . . . .	23
2.4 Formale Struktur regulärer Zusammenhänge . . . . .	25
2.5 pull-back und push-forward . . . . .	25
2.6 Fouriertransformation . . . . .	33
<b>3 Elementare Meromorphe Zusammenhänge</b>	<b>34</b>
3.1 Defnition in [Sab07] . . . . .	38
3.2 Twisten von Meromorphen Zusammenhängen . . . . .	39
<b>4 Levelt-Turrittin-Theorem</b>	<b>40</b>
4.1 Klassische Version . . . . .	40
4.2 Sabbah's Refined version . . . . .	42

<b>5</b>	<b>DIE Klasse der Fourier-Transformationen</b>	<b>43</b>
5.1	Rezept für allgemeine $\varphi$ . . . . .	43
5.2	Levelt-Turrittin-Zerlegung für $\mathcal{M}_\varphi$ mit $\varphi_1 := \frac{a}{x}$ . . . . .	49
5.2.1	Konvergenz der Summanden . . . . .	57
	<b>Anhang</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Aufteilung von <math>t\varphi'(t)</math></b>	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>Genaueres zu <math>(x^2\partial_x)^k</math></b>	<b>66</b>
<b>C</b>	<b>Numerische berechnung der Koeffizienten</b>	<b>67</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Newton-Polygon zu $P_1 = x\partial_x^2$ . . . . .	20
2.2	Newton-Polygon zu $P_2$ . . . . .	20
2.3	Newton Polygon zu $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$ . . . . .	22
2.4	Newton Polygon zu $P$ . . . . .	23
2.5	Newton Polygon zu $P = x^3\partial_x^2 - 4x^2\partial_x - 1$ . . . . .	31
2.6	Newton Polygon zu $\rho^+P = \frac{1}{4}t^4\partial_t^2 - \frac{1}{2}t^3\partial_t - 1$ . . . . .	31
5.1	Newton-Polygon zu $P_\varphi$ . . . . .	46
5.2	Newton Polygon zu $P_\varphi$ . . . . .	50
5.3	Newton Polygon zu $\rho^*P_\varphi$ . . . . .	50
5.4	Newton Polygon zu $\mathcal{N}$ . . . . .	52
5.5	Newton-Polygon zu $Q_1$ . . . . .	54
5.6	Newton-Polygon zu $Q_2$ . . . . .	54
5.7	Koeffizienten in abhängigkeit von $a$ . . . . .	61

# Tabellenverzeichnis

C.1	Numerisch berechnete Koeffizienten von $u(t)$ und $v(t)$ für $a = \frac{1}{8}$ . . . . .	70
-----	--	----

# Einleitung

# 0 Mathematische Grundlagen

Kommentar: Hier werde ich mich auf [Sab90] und [Cou95] beziehen.

Wir betrachten  $\mathbb{C}$  hier als Komplexe Mannigfaltigkeit mit der Klassischen Topologie. In dieser Arbeit spielen die folgenden Funktionenräume eine große Rolle:

- $\mathbb{C}[x] := \{\sum_{i=1}^N a_i x^i \mid N \in \mathbb{N}\}$  die einfachen Potenzreihen
- $\mathbb{C}\{x\} := \{\sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i \mid \text{pos. Konvergenzradius}\}$  ([HTT07, Chap 5.1.1])
- $\mathbb{C}[[x]] := \{\sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i\}$  die formalen Potenzreihen
- $K := \mathbb{C}(\{x\}) := \mathbb{C}\{x\}[x^{-1}]$  der Ring der Laurent Reihen.
- $\widehat{K} := \mathbb{C}((x)) := \mathbb{C}[[x]][x^{-1}]$  der Ring der formalen Laurent Reihen.
- $\tilde{\mathcal{O}}$  als der Raum der Keime aller (möglicherweise mehrdeutigen) Funktionen. (bei [HTT07] mit  $\tilde{K}$  bezeichnet)

Wobei offensichtlich die Inklusionen  $\mathbb{C}[x] \subsetneq \mathbb{C}\{x\} \subsetneq \mathbb{C}[[x]]$  und  $K \subsetneq \widehat{K}$  gelten.

Kommentar: Es bezeichnet der Hut ( $\widehat{\phantom{x}}$ ) das jeweils formale äquivalent zu einem konvergentem Objekt.

Kommentar:

**Lemma 0.1** (Seite 2). *ein paar eigenschaften*

1.  $\mathbb{C}[x]$  ist ein graduierter Ring, durch die Grad der Polynome. Diese Graduierung induziert eine aufsteigende Filtrierung.

*alle Ideale haben die form  $(x - a)$  mit  $a \in \mathbb{C}$*



$$\begin{array}{ccc} M \times N & \longrightarrow & M \otimes_R N \\ & \searrow f & \downarrow \exists! \gamma \\ & & T \end{array}$$

Für eine Abbildung  $f : M \rightarrow M'$  definiere das Tensorprodukt davon über  $R$  mit  $N$  als

$$\begin{aligned} \text{id}_N \otimes f : N \otimes_R M &\rightarrow N \otimes_R M' \\ n \otimes m &\mapsto n \otimes f(m) \end{aligned}$$

*Bemerkung 0.4.* Hier ein paar Rechenregeln für das Tensorprodukt,

$$(M \otimes_R N) \otimes_S L \cong M \otimes_R (N \otimes_S L) \quad (0.1)$$

$$M \otimes_R R \cong M \quad (0.2)$$

Sei  $f : M' \rightarrow M$  eine Abbildung, so gilt

$$N \otimes_R (M / \text{im}(f)) \cong N \otimes_R M / \text{im}(\text{id}_R \otimes f) \quad (0.3)$$

**Definition 0.5** (Exakte Sequenz). Eine Sequenz

$$\cdots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \longrightarrow \cdots$$

heißt exact, wenn für alle  $i$  gilt, dass  $\text{im}(f_{i-1}) = \ker f_i$ .

**Definition 0.6** (Kurze exacte Sequenz). Eine kurze exacte Sequenz ist eine Sequenz

$$0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$$

welche exact ist.

**Definition 0.7** (Kokern). Ist  $f : M' \rightarrow M$  eine Abbildung, so ist der *Kokern* von  $f$  definiert als  $\text{coker}(f) = M / \text{im}(f)$ .

**Proposition 0.8.** Ist  $f : M' \rightarrow M$  eine injektive Abbildung, so ist

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{f} & M & \xrightarrow{\pi} & M / f(M') \longrightarrow 0 \\ & & & & m & \longmapsto & m \bmod f(M') \end{array}$$



eine kurze exacte Sequenz und  $M/f(M') = \text{coker}(f)$  ist der Kokern von  $f$ .

*Beweis.*

□

**Definition 0.9** (Filtrierung). [Sta12, Def 10.13.1.] [Ell10, Rem 2.5.] Eine *aufsteigende Filtrierung*  $F$  von einem Objekt (Ring)  $A$  ist eine Familie von  $(F_i A)_{i \in \mathbb{Z}}$  von Unterobjekten (Unter-ring), so dass

$$0 \subset \cdots \subset F_i \subset F_{i+1} \subset \cdots \subset A$$

und definiere weiter  $gr_i^F A := F_i A / F_{i-1} A$  und damit das zu  $A$  mit Filtrierung  $F$  assoziierte *graduierete Modul*

$$gr^F A := \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} gr_k^F A.$$

Kommentar:  $gr_i^F$  als was??

**Definition 0.10.** [Ayo09] [Sab90, Def 3.2.1] Eine Filtrierung heißt *gut*, falls ...

# 1 Moduln über $\mathcal{D}_k$

Ich werde hier die Weyl Algebra, wie in [Sab90, Chapter 1], in einer Veränderlichen einführen. Wir werden als  $k$  immer ein Element aus  $\{\mathbb{C}[x], \mathbb{C}\{x\}, \mathbb{C}[[x]], K, \widehat{K}\}$  betrachten.

**Definition 1.1** (Kommutator). Sei  $R$  ein Ring. Für  $a, b \in R$  wird

$$[a, b] = a \cdot b - b \cdot a$$

als der *Kommutator von  $a$  und  $b$*  definiert.

**Proposition 1.2.** Sei  $k \in \{\mathbb{C}[x], \mathbb{C}\{x\}, \mathbb{C}[[x]], K, \widehat{K}\}$ . Sei  $\partial_x : k \rightarrow k$  der gewohnte Ableitungsoperator nach  $x$ , so gilt

$$1. \quad [\partial_x, x] = \partial_x x - x \partial_x = 1$$

2. für  $f \in k$  ist

$$[\partial_x, f] = \frac{\partial f}{\partial x}.$$

3. Es gelten die Formeln

$$[\partial_x, x^k] = kx^{k-1} \tag{1.1}$$

$$[\partial_x^j, x] = j\partial_x^{j-1} \tag{1.2}$$

$$[\partial_x^j, x^k] = \sum_{i \geq 1} \frac{k(k-1) \cdots (k-i+1) \cdot j(j-1) \cdots (j-i+1)}{i!} x^{k-i} \partial_x^{j-i} \tag{1.3}$$

*Beweis.* 1. Klar.

2. Für ein Testobjekt  $g \in k$  ist

$$[\partial_x, f] \cdot g = \partial_x(fg) - f\partial_x g = (\partial_x f)g + \underbrace{f(\partial_x g) - f(\partial_x g)}_{=0} = (\partial_x f)g$$

3. Siehe [AV09, ???]

□

## 1.1 Weyl-Algebra und der Ring $\mathcal{D}_k$

Sei dazu  $\frac{\partial}{\partial x} = \partial_x$  der Ableitungsoperator nach  $x$  und sei  $f \in k$ . Man hat die folgende Kommutations-Relation zwischen dem *Ableitungsoperator* und dem *Multiplikations Operator*  $f$ :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, f\right] = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (1.4)$$

wobei die Rechte Seite die Multiplikation mit  $\frac{\partial f}{\partial x}$  darstellt. Dies bedeutet, für alle  $g \in \mathbb{C}[x]$  hat man

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, f\right] \cdot g = \frac{\partial fg}{\partial x} - f \frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot g.$$

**Definition 1.3.** Definiere nun den Ring  $\mathcal{D}_k$  als die Quotientenalgebra der freien Algebra, welche von dem Koeffizientenring in  $k$  zusammen mit dem Element  $\partial_x$ , erzeugt wird, Modulo der Relation (1.4). Wir schreiben diesen Ring auch als

- $A_1(\mathbb{C}) := \mathbb{C}[x] \langle \partial_x \rangle$  falls  $k = \mathbb{C}[x]$ , und nennen ihn die *Weyl Algebra*
- $\mathcal{D} := \mathbb{C}\{x\} \langle \partial_x \rangle$  falls  $k = \mathbb{C}\{x\}$
- $\widehat{\mathcal{D}} := \mathbb{C}[[x]] \langle \partial_x \rangle$  falls  $k = \mathbb{C}[[x]]$
- $\mathcal{D}_K := \mathbb{C}(\{x\}) \langle \partial_x \rangle$  falls  $k = K \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}\{x\}[x^{-1}]$
- $\mathcal{D}_{\widehat{K}} := \mathbb{C}((x)) \langle \partial_x \rangle$  falls  $k = \widehat{K} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}[[x]][x^{-1}]$  <sup>[1]</sup>.

*Bemerkung 1.4.* • Es gilt  $\mathcal{D}[x^{-1}] = \mathcal{D}_K$  und  $\widehat{\mathcal{D}}[x^{-1}] = \mathcal{D}_{\widehat{K}}$

- Offensichtlich erhält  $\mathcal{D}_k$  in kanonischer Weise eine Ringstruktur, dies ist in [AV09, Kapitel 2 Section 1] genauer ausgeführt.
- $\mathcal{D}_k$  ist offensichtlich nichtkommutativ.

**Proposition 1.5.** [Sab90, Proposition 1.2.3] Jedes Element in  $\mathcal{D}_k$  kann auf eindeutige Weise als  $P = \sum_{i=0}^n a_i(x) \partial_x^i$ , mit  $a_i(x) \in k$ , geschrieben werden.

*Beweis.* Siehe [Sab90, Proposition 1.2.3]

**Kommentar:** ein teil des Beweises ist "left as an exercise"

□

<sup>[1]</sup>Wird mit  $\widehat{\mathcal{D}}_{\widehat{K}}$  bezeichnet, in [AV09].

Kommentar: Gilt das folgende??

$$\alpha_i(x)\partial_x^i \equiv \frac{\alpha_i}{x^i}(x\partial_x)^i \mod F_{i-1}\mathcal{D}$$

Kommentar: Besser?:

erst Filtrierung definieren und dadurch dann den Grad?

**Definition 1.6.** Sei  $P = \sum_{i=0}^n a_i(x)\partial_x^i$ , wie in Proposition 1.5, gegeben, so definiere

$$\deg P := \max\{i \mid a_i \neq 0\}$$

als den *Grad* (oder den  $\partial_x$ -Grad) von  $P$ .

Kommentar: Unabhängigkeit von Schreibung? Sabbah script!

In natürlicher Weise erhält man die aufsteigende Filtrierung  $F_N\mathcal{D} := \{P \in \mathcal{D} \mid \deg P \leq N\}$  mit

$$\cdots \subset F_{-1}\mathcal{D} \subset F_0\mathcal{D} \subset F_1\mathcal{D} \subset \cdots \subset \mathcal{D}$$

und erhalte  $gr_k^F\mathcal{D} \stackrel{\text{def}}{=} F_N\mathcal{D}/F_{N-1}\mathcal{D} = \{P \in \mathcal{D} \mid \deg P = N\} \cong \mathbb{C}\{x\}$ .

*Beweis.* Sei  $P \in F_N\mathcal{D}$  so betrachte den Isomorphismus:

$$F_N\mathcal{D}/F_{N-1}\mathcal{D} \rightarrow \mathbb{C}\{x\}; [P] = P + F_{N-1}\mathcal{D} \mapsto a_n(x)$$

□

**Proposition 1.7.** *Es gilt:*

$$gr^F\mathcal{D} := \bigoplus_{N \in \mathbb{Z}} gr_N^F\mathcal{D} = \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} gr_N^F\mathcal{D} \cong \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cong \mathbb{C}\{x\}[\xi] = \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cdot \xi^N$$

$\cong$   
*isomorph als grad. Ringe*

also  $gr^F\mathcal{D} \cong \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cdot \xi^N$  als graduierte Ringe.

*Beweis.* TODO

Kommentar: Treffen?

□

### 1.1.1 Alternative Definition / Sichtweise

Kommentar: Nur abgeschrieben

[Kas03, Chap 1.1.] Sei  $X$  eine 1-Dimensionale komplexe Mannigfaltigkeit und  $\mathcal{O}_X$  die Garbe der holomorphen Funktionen auf  $X$ . Ein (*holomorpher*) *differenzial Operator* auf  $X$  ist ein Garben-Morphismus  $P : \mathcal{O}_X \rightarrow \mathcal{O}_X$ , lokal in der Koordinate  $x$  und mit holomorphen Funktionen  $a_n(x)$  als

$$(Pu)(x) = \sum_{n \geq 0} a_n(x) \partial_x^n u(x)$$

geschrieben (für  $u \in \mathcal{O}_X$ ). Zusätzlich nehmen wir an, dass  $a_n(x) \equiv 0$  für fast alle  $n \in \mathbb{N}$  gilt. Wir setzen  $\partial_x^n u(x) = \frac{\partial^n u}{\partial x^n}(x)$ . Wir sagen ein Operator hat höchstens Ordnung  $m$ , falls  $\forall n \geq m : a_n(x) \equiv 0$ .

**Definition 1.8.** Mit  $\mathcal{D}_X$  bezeichnen wir die *Garbe von Differentialoperatoren* auf  $X$ .

Die Garbe  $\mathcal{D}_X$  hat eine Ring Struktur mittels der Komposition als Multiplikation und  $\mathcal{O}_X$  ist ein Unterring von  $\mathcal{D}_X$ . Sei  $\Theta_X$  die Garbe der Vektorfelder über  $X$ . Es gilt, dass  $\Theta_X$  in  $\mathcal{D}_X$  enthalten ist. Bemerke auch, dass  $\Theta_X$  ein links  $\mathcal{O}_X$ -Untermodul, aber kein rechts  $\mathcal{O}_X$ -Untermodul ist.

**Proposition 1.9.** [Ark12, Exmp 1.1] Sei  $X = \mathbb{A}^1 = \mathbb{C}$ ,  $\mathcal{O}_X = \mathbb{C}[t]$  und  $\Theta_X = \mathbb{C}[x]\partial_x$ . Wobei  $\partial_x$  als  $\partial_x(x^n) = nx^{n-1}$  wirkt. Dann sind die Differentialoperatoren

$$\mathcal{D}_X = \mathbb{C}[x, \partial_x], \quad \text{mit} \quad \partial_x x - x \partial_x = 1.$$

Somit stimmt die Alternative Definition schon mal mit der Einfachen überein.

Kommentar:

**Definition 1.10.** [Ark12, Defn 2.1] Sei  $X = \mathbb{A}^1$ ,  $\mathcal{O}_X = \mathbb{C}[x]$  und  $\mathcal{D}_X = [x, \partial_x]$  mit der Relation  $[\partial_x, x] = 1$ . Dann definieren wir die links  $\mathcal{D}$ -Moduln über  $\mathbb{A}^1$  als die  $\mathbb{C}[x, \partial_x]$ -Moduln. Sie werden geschrieben als  $\mathcal{D} - \text{mod}(\mathbb{A}^1)$

## 1.2 (Links) $\mathcal{D}$ -Moduln

Da  $\mathcal{D}$  ein nichtkommutativer Ring ist, muss man vorsichtig sein und zwischen links und rechts  $\mathcal{D}$ -Moduln unterscheiden. Wenn ich im folgendem von  $\mathcal{D}$ -Moduln rede, werde ich mich immer auf links  $\mathcal{D}$ -Moduln beziehen.

**Beispiel 1.11** (links  $\mathcal{D}$ -Moduln). [Ark12, Exmp 2.2]

1.  $\mathcal{D}$  ist ein links und rechts  $\mathcal{D}$ -Modul
2.  $\mathcal{M} = \mathbb{C}[x]$  oder  $\mathcal{M} = \mathbb{C}[x, x^{-1}]$  jeweils durch  $x \cdot x^m = x^{m+1}$  und  $\partial(x^m) = mx^{m-1}$
3. [Ark12, Exmp 2.2] Führe formal, also ohne analytischen Hintergrund, ein Symbol  $\exp(\lambda x)$  ein, mit  $\partial(f(x) \exp(\lambda x)) = \frac{\partial f}{\partial x} \exp(\lambda x) + f \lambda \exp(\lambda x)$ . So ist  $\mathcal{M} = \mathcal{O}_X \exp(\lambda x)$  ein  $\mathcal{D}$ -Modul.
4. [Gin98, Exmp 3.1.4] Führe formal ein Symbol  $\log(x)$  mit den Eigenschaften  $\partial_x \log(x) = \frac{1}{x}$  ein. Erhalte nun das  $\mathcal{D}$ -Modul  $\mathbb{C}[x] \log(x) + \mathbb{C}[x, x^{-1}]$ . Dieses Modul ist über  $\mathcal{D}$  erzeugt durch  $\log(x)$  und man hat

$$\mathbb{C}[x] \log(x) + \mathbb{C}[x, x^{-1}] = \mathcal{D} \cdot \log(x) = \mathcal{D} / \mathcal{D}(\partial_x x \partial_x).$$

Kommentar:

**Lemma 1.12.** [Sab90, Lem 2.3.3.] Sei  $\mathcal{M}$  ein links  $\mathcal{D}$ -Modul von endlichem Typ, welches auch von endlichem Typ über  $\mathbb{C}\{x\}$  ist. Dann ist  $\mathcal{M}$  bereits ein freies  $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul.

*Beweis.* Siehe [Sab90, Lem 2.3.3.] □

**Korollar 1.13.** [Sab90, Cor 2.3.4.] Falls  $\mathcal{M}$  ein links  $\mathcal{D}$ -Modul von endlichem typ, welches außerdem ein endlich dimensionaler Vektorraum ist, so ist schon  $\mathcal{M} = \{0\}$ .

### 1.2.1 Holonome $\mathcal{D}$ -Moduln

Kommentar: TODO: defn of Car als Charakteristische Varietät

**Definition 1.14.** [Sab90, Def 3.3.1.] Sei  $\mathcal{M}$  lineares Differentialsystem (linear differential system). Man sagt,  $\mathcal{M}$  ist holonom, falls  $\mathcal{M} = 0$  oder falls  $\text{Car } \mathcal{M} \subset \{x = 0\} \cup \xi = 0$ .

**Lemma 1.15.** [Sab90, Lem 3.3.8.] Ein  $\mathcal{D}$ -Modul ist holonom genau dann, wenn  $\dim_{gr^F \mathcal{D}, 0} gr^F \mathcal{M} = 1$ .

*Beweis.* Siehe [Sab90, Lem 3.3.8.] □

### Alternative Definition A

Kommentar: Countinho definiert die Charakteristische Varietät erst nach holonom

**Definition 1.16** (Holonome  $\mathcal{D}$ -Moduln). [Cou95, Chap 10 §1] Ein endlich generierter  $\mathcal{D}$ -Modul  $\mathcal{M}$  ist *holonom*, falls  $\mathcal{M} = 0$  gilt, oder falls es die Dimension 1 hat.

*Bemerkung 1.17.* [Cou95, Chap 10 §1] Sei  $\mathfrak{a} \neq 0$  ein Links-Ideal von  $\mathcal{D}$ . Es gilt nach [Cou95, Corollary 9.3.5], dass  $d(\mathcal{D}/\mathfrak{a}) \leq 1$ . Falls  $\mathfrak{a} \neq \mathcal{D}$ , dann gilt nach der *Bernstein's inequality* [Cou95, Chap 9 §4], dass  $d(\mathcal{D}/\mathfrak{a}) = 1$ . Somit ist  $\mathcal{D}/\mathfrak{a}$  ein holonomes  $\mathcal{D}$ -Modul.

*Bemerkung 1.18.* [Cou95, Prop 10.1.1]

- Submoduln und Quotienten von holonomen  $\mathcal{D}$ -Moduln sind holonom.
- Endliche Summen von holonomen  $\mathcal{D}$ -Moduln sind holonom.

### Alternative Definition B

**Definition 1.19.** Ein lokalisiertes  $\mathcal{D}$ -Modul  $\mathcal{M}$  heißt *holonom*, falls es ein  $\mathfrak{a} \triangleleft \mathcal{D}$  gibt, so dass

$$\mathcal{M} \cong \mathcal{D}/\mathfrak{a}.$$

*Bemerkung 1.20.* In [Cou95] wird dies über die Dimension definiert, und bei [Sab90] über die Charakteristische Varietät.

Kommentar:

## 1.3 Lokalisierung von $\mathbb{C}\{x\}$ -Moduln

[Sab90, Chap 4.1.] Sei  $M$  ein  $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul. Wir schreiben  $M[x^{-1}]$  für den  $K$ -Vektor Raum  $M \otimes_{\mathbb{C}\{x\}} K$ . Im allgemeinen gilt, falls  $M$  von endlichem Typ über  $\mathbb{C}\{x\}$  ist, so ist  $M[x^{-1}]$  von endlichem Typ über  $K$ . Bemerke aber, dass  $M[x^{-1}]$  generell nicht von endlichem Typ über  $\mathbb{C}\{x\}$  ist.

## 1.4 Lokalisierung eines $\mathcal{D}$ -Moduls

[Sab90, Chap 4.2.] Sei  $\mathcal{M}$  ein links  $\mathcal{D}$ -Modul. Betrachte  $\mathcal{M}$  als  $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul und definiere darauf

$$\mathcal{M}[x^{-1}] := \mathcal{M} \otimes_{\mathbb{C}\{x\}} K$$

als die Lokalisierung von  $\mathcal{M}$ .

**Proposition 1.21.** [Sab90, Prop 4.2.1.]  $\mathcal{M}[x^{-1}]$  erhält in natürlicher Weise eine  $\mathcal{D}$ -Modul Struktur.

*Beweis.* [Sab90, Prop 4.2.1.] mit:

$$\partial_x(m \otimes x^{-k}) = ((\partial_x m) \otimes x^{-k}) - km \otimes x^{-k-1}$$

Kommentar: beweis der  $\mathcal{D}$ -linearität ist als übung gelassen

□

**Korollar 1.22.** [Sab90, Cor 4.2.8.] Sei  $\mathcal{M}$  ein holonomes Modul. Dann ist die lokalisierung von  $\mathcal{M}$  isomorph zu  $\mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot P$  für ein  $P \in \mathcal{D} \setminus \{0\}$

Kommentar: Formal??



## 2 Meromorphe Zusammenhänge

Sei  $\mathcal{M}$  ein  $\mathcal{D}$ -Modul ungleich Null von endlichem Typ. Falls die links-Multiplikation mit  $x$  bijektiv ist, so nennen wir  $\mathcal{M}$  einen Meromorphen Zusammenhang. [Sab90, Chap 4]

### 2.1 Systeme von ODEs und Meromorphe Zusammenhänge

[HTT07, Chap 5.1.1] Für eine Matrix  $A(x) = (a_{ij}(x))_{ij} \in M(n \times n, K)$  betrachten wir das System von gewöhnlichen Differentialgleichungen (kurz ODEs)

$$\frac{d}{dx}u(x) = A(x)u(x) \tag{2.1}$$

wobei  $u(x) = {}^t(u_1(x), \dots, u_n(x))$  ein Spaltenvektor von unbekannten Funktionen. Wir werden (2.1) immer in einer Umgebung um  $x = 0 \in \mathbb{C}$  betrachten. Als Lösungen von (2.1) betrachten wir Keime von holomorphen (aber möglicherweise mehrdeutigen) Funktionen an  $x = 0$  (geschrieben als  $\tilde{\mathcal{O}}$ ). Wir sagen  $v(x) = {}^t(v_1(x), \dots, v_n(x))$  ist eine Lösung von (2.1), falls  $v_i \in \tilde{\mathcal{O}}$  für alle  $i \in \{1, \dots, n\}$  und  $v$  die Gleichung (2.1), auf einer Umgebung um die 0, erfüllt.

**Kommentar:** TODO: zeige, dass der Lösungsraum die Eigenschaften von  $\mathcal{D}$ -Moduln erfüllt  
siehe alternativer Zugang

#### Alternativer Zugang

**Kommentar:** Sei  $P$  ein linearer Differentialoperator mit Koeffizienten in  $a_i(x) \in \mathbb{C}\{x\}$  geschrieben als  $P = \sum_{i=0}^d a_i(x)\partial_x^i$ . Man sagt eine Funktion  $u \in \mathcal{F}$  ist Lösung von  $P$ , falls  $u$  die Gleichung  $Pu = 0$  erfüllt. Man sagt 0 ist ein singulärer Punkt falls  $a_d(0) = 0$ . Falls 0 kein singulärer Punkt ist, hat  $P$  genau  $d$  über  $\mathbb{C}$  unabhängige Lösungen in  $\mathbb{C}\{x\}$ .

[Sab90, 3.1.1] Sei  $\mathcal{F}$  ein Funktionenraum, auf dem die Differentialoperatoren  $\mathcal{D}$  wirken. Ein Element  $u \in \mathcal{F}$  ist Lösung von  $P \in \mathcal{D}$  falls  $P \cdot u = 0$  gilt.

Falls  $u$  ein Lösung von  $P$  ist, so ist  $u$  auch Lösung von  $Q \cdot P$  mit  $Q \in \mathcal{D}$ . Also hängt die Lösung nur vom Links Ideal  $\mathcal{D} \cdot P \triangleleft \mathcal{D}$  ab.

### 2.1.1 Meromorphe Zusammenhänge

Nun wollen wir dieses Klassische Gebilde nun in die moderne Sprache der Meromorphen Zusammenhänge übersetzen.

**Definition 2.1** (Meromorpher Zusammenhang). Ein *Meromorpher Zusammenhang* (bei  $x = 0$ ) ist ein Tuppel  $(\mathcal{M}_K, \partial)$  und besteht aus folgenden Daten:

- $\mathcal{M}_K$ , ein endlich dimensionaler  $K$ -Vektor Raum
- einer  $\mathbb{C}$ -linearen Abbildung  $\partial : \mathcal{M}_K \rightarrow \mathcal{M}_K$ , genannt *Derivation* oder *Zusammenhang*, welche für alle  $f \in K$  und  $u \in \mathcal{M}_K$  die *Leibnitzregel*

$$\partial(fu) = f'u + f\partial u \quad (2.2)$$

erfüllen soll.

*Bemerkung 2.2* (Formaler Meromorpher Zusammenhang). Analog definiert man einen *formalen Meromorphen Zusammenhang*  $(\mathcal{M}_{\widehat{K}}, \partial)$  bestehend, analog wie in Definition 2.1, aus folgenden Daten:

- $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ , ein endlich dimensionaler  $\widehat{K}$ -Vektor Raum
- einer  $\mathbb{C}$ -linearen Derivation  $\partial : \mathcal{M}_{\widehat{K}} \rightarrow \mathcal{M}_{\widehat{K}}$ , welche die *Leibnitzregel* (2.2) erfüllen soll.

**Definition 2.3.** Seien  $(\mathcal{M}_K, \partial_{\mathcal{M}})$  und  $(\mathcal{N}_K, \partial_{\mathcal{N}})$  zwei Meromorphe Zusammenhänge. Eine  $K$ -lineare Abbildung  $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$  heißt Morphismus von Meromorphen Zusammenhängen, falls sie  $\varphi \circ \partial_{\mathcal{M}} = \varphi \circ \partial_{\mathcal{N}}$  erfüllt. In diesem Fall schreiben wir auch  $\varphi : (\mathcal{M}_K, \partial_{\mathcal{M}}) \rightarrow (\mathcal{N}_K, \partial_{\mathcal{N}})$ .

**Kommentar:** TODO: Wann sind die Isomorph  $\mathcal{M} \cong \mathcal{N}$  und die Ableitungen kommutieren mit dem Isomorphismus

**Definition 2.4.** Wir erhalten damit die Kategorie der meromorphen Zusammenhänge über  $\widehat{K}$  mit

Objekte:  $()$

*Bemerkung 2.5.* 1. Später wird man auf die Angabe von  $\partial$  verzichten und einfach  $\mathcal{M}_K$  als den Meromorphen Zusammenhang bezeichnen, auch wird manchmal auf die Angabe von  $K$  verzichtet.

2. [HTT07, Rem 5.1.2.] Die Bedingung (2.2) ist zur schwächeren Bedingung

$$\partial(fu) = f'u + f\partial u,$$

welche für alle  $f \in \tilde{\mathcal{O}}$  und für alle  $u \in \mathcal{M}_K$  erfüllt sein muss, äquivalent.

**Definition 2.6** (Zusammenhangsmatrix). [HTT07, Seite 129] Sei  $(\mathcal{M}_K, \partial)$  ein Meromorpher Zusammenhang so wähle eine  $K$ -Basis  $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$  von  $\mathcal{M}$ . Dann ist die *Zusammenhangsmatrix bzgl. der Basis*  $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$  die Matrix  $A(x) = (a_{ij}(x)) \in M(n \times n, K)$  definiert durch

$$a_{ij}(x) = -{}^t e_i \partial e_j.$$

Also ist, bezüglich der Basis  $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$ , die Wirkung von  $\partial$  auf  $u = {}^t(u_1, \dots, u_n)$  beschrieben durch

$$\begin{aligned} \partial(u) &= \partial\left(\sum_{i=1}^n u_i(x) e_i\right) \stackrel{??}{=} \sum_{i=1}^n \left(u'_i(x) - \sum_{j=1}^n a_{ij} u_j(x)\right) e_i. \end{aligned}$$

Einfache Umformungen zeigen, dass die Bedingung  $\partial u(x) = 0$ , für  $u(x) \in \sum_{i=1}^n u_i e_i \in \tilde{\mathcal{O}} \otimes_K \mathcal{M}$ , äquivalent zu der Gleichung

$$u'(x) = A(x)u(x)$$

für  $u(x) = {}^t(u_1(x), \dots, u_n(x)) \in \tilde{\mathcal{O}}^n$ . Damit haben wir gesehen, dass jeder Meromorphe Zusammenhang  $(\mathcal{M}, \partial)$  ausgestattet mit einer  $K$ -Basis  $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$  von  $\mathcal{M}$  zu einem ODE zugeordnet werden kann.

Umgekehrt können wir für jede Matrix  $A(x) = (a_{ij}(x))$  den assoziierten Meromorphen Zusammenhang  $(\mathcal{M}_A, \partial_A)$  angeben, durch

$$\mathcal{M}_A := \bigoplus_{i=1}^n K e_i, \quad \partial_A e_i := - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x) e_j.$$

## 2.2 Eigenschaften / Äquivalenz zu holonomen lokalisierten $\mathcal{D}$ -Moduln

Kommentar: [Sab90, 4.2] Let  $\mathcal{M}$  be a left  $\mathcal{D}$ -module. First we consider it only as a  $\mathbb{C}\{x\}$ -module and let  $\mathcal{M}[x^{-1}]$  be the localized module.

**Lemma 2.7** (Lemma vom zyklischen Vektor). [Sab90, Thm 4.3.3] [AV09, Satz 4.8] Sei  $\mathcal{M}_K$  ein Meromorpher Zusammenhang. Es Existiert ein Element  $m \in \mathcal{M}_K$  und eine ganze Zahl  $d$  so dass  $m, \partial_x m, \dots, \partial_x^{d-1} m$  eine  $K$ -Basis von  $\mathcal{M}_K$  ist.

Beweis. [AV09, Satz 4.8] □

Kommentar: TODO: Wie findet man einen Zyklischen Vektor  
TODO: wie bekommt man daraus das  $P$

**Satz 2.8.** [Sab90, Thm 4.3.2] Ein Meromorpher Zusammenhang bestimmt ein holonomes lokalisiertes  $\mathcal{D}_K$ -Modul und andersherum.

Beweis. [Sab90, Thm 4.3.2] □

**Lemma/Definition 2.9.** [AV09, Satz 4.12] [Sab90, Thm 4.3.2] Ist  $\mathcal{M}_K$  ein Meromorpher Zusammenhang, dann existiert ein  $P \in \mathcal{D}_K$  so dass  $\mathcal{M}_K \cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P$ . So ein  $P$  heißt dann Minimalpolynom von  $\mathcal{M}_K$ .

Beweis. [AV09, Satz 4.12] □

Kommentar:

Bemerkung 2.10. [Sab90, Proof of Theorem 5.4.7]

$$\dim_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \deg P \text{ wenn } \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D} / \mathcal{D} \cdot P$$

**Satz 2.11.** [AV09, Seite 64] Ist  $P = P_1 \cdot P_2$  mit  $P_1, P_2 \in \mathcal{D}_K$  so gilt

$$\mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P \cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_1 \oplus \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_2.$$

Beweis. [AV09, Seite 57-64] □

**Korollar 2.12.** Sei  $P = P_1 \cdot P_2$  mit  $P_1, P_2 \in \mathcal{D}_K$  wie in Satz 2.11 so gilt

$$\mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot (P_1 \cdot P_2) \cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot (P_2 \cdot P_1)$$

*Beweis.*

$$\begin{aligned}
 \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P &= \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot (P_1 \cdot P_2) \\
 &\cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_1 \oplus \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_2 \\
 &= \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_2 \oplus \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_1 \\
 &\cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot (P_2 \cdot P_1)
 \end{aligned}$$

□

**Lemma 2.13.** *Sei  $(\mathcal{M}_K, \partial)$  ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und  $\varphi$  ein Basisisomorphismus von  $K^r$  nach  $\mathcal{M}_K$ , also in der Situation*

$$\begin{array}{ccc}
 \mathcal{M}_K & \xrightarrow{\partial} & \mathcal{M}_K \\
 \uparrow \cong \varphi & & \uparrow \varphi \cong \\
 K^r & \xrightarrow{\varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi} & K^r
 \end{array}$$

*gilt:  $(K^r, \varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi)$  ist ebenfalls ein Meromorpher Zusammenhang.*

*Beweis.* TODO, (3. Treffen)

□

Kommentar:

**Lemma 2.14.** *Sei  $(\mathcal{M}_K, \partial)$  ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und  $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$  ein Isomorphismus so ist  $(\mathcal{N}, \varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi)$  ein zu  $(\mathcal{M}_K, \partial)$  isomorpher Zusammenhang.*

$$\begin{array}{ccc}
 \mathcal{M}_K & \xrightarrow{\partial} & \mathcal{M}_K \\
 \uparrow \cong \varphi & & \uparrow \varphi \cong \\
 \mathcal{N} & \xrightarrow{\varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi} & \mathcal{N}
 \end{array}$$

*Beweis.* TODO, (3. Treffen)

□

**Lemma 2.15.** *Sei  $\mathcal{M}_K$  ein endlich dimensionaler  $K$ -Vektor Raum mit  $\partial_1$  und  $\partial_2$  zwei darauf definierte Derivationen. So gilt, die Differenz zweier Derivationen ist  $K$ -linear.*

*Beweis.* Seien  $\partial_1$  und  $\partial_2$  zwei Derivationen auf  $\mathcal{M}_K$ . Da  $\partial_1$  und  $\partial_2$   $\mathbb{C}$ -linear, ist  $\partial_1 - \partial_2$   $\mathbb{C}$ -linear, also muss nur noch gezeigt werden, dass  $(\partial_1 - \partial_2)(fu) = f \cdot (\partial_1 - \partial_2)(u) \forall f \in K$  und  $u \in \mathcal{M}_K$  gilt.

$$\begin{aligned} (\partial_1 - \partial_2)(fu) &= \partial_1(fu) - \partial_2(fu) \\ &= f'u + f\partial_1 u - f'u - f\partial_2 u \\ &= \underbrace{f'u - f'u}_{=0} + f \cdot (\partial_1 u - \partial_2 u) \\ &= f \cdot (\partial_1 - \partial_2)(u) \end{aligned}$$

□

**Korollar 2.16.** Für  $(K^r, \partial)$  ein Meromorpher Zusammenhang existiert ein  $A \in M(r \times r, K)$ , so dass  $\partial = \frac{d}{dx} - A$ .

*Beweis.* Es sei  $(K^r, \partial)$  ein Meromorpher Zusammenhang. So ist  $\frac{d}{dx} - \partial : K^r \rightarrow K^r$   $K$ -linear, also lässt sich durch eine Matrix  $A \in M(r \times r, K)$  darstellen, also ist, wie behauptet,  $\partial = \frac{d}{dx} - A$ . □

**Proposition 2.17** (Transformationsformel). [HTT07, Chap 5.1.1] In der Situation

$$\begin{array}{ccccc} K^r & & \xrightarrow{\frac{d}{dz} + A} & & K^r \\ & \nearrow \cong & & \nwarrow \cong & \\ & M & \xrightarrow{\partial} & M & \\ & \nwarrow \cong & & \nearrow \cong & \\ K^r & & \xrightarrow{\frac{d}{dz} + B} & & K^r \end{array}$$

mit  $\varphi, \psi$  und  $T$   $K$ -Linear und  $\partial, (\frac{d}{dx} + A)$  und  $(\frac{d}{dx} + B)$   $\mathbb{C}$ -Linear, gilt:

Der Meromorphe Zusammenhang  $\frac{d}{dx} + A$  auf  $K^r$  wird durch Basiswechsel  $T \in GL(r, K)$  zu

$$\frac{d}{dx} + (T^{-1} \cdot T' + T^{-1}AT) = \frac{d}{dx} + B$$

**Definition 2.18** (Differenziell Äquivalent). Man nennt  $A$  und  $B$  differenziell Äquivalent ( $A \sim B$ ) genau dann, wenn es ein  $T \in GL(r, K)$  gibt, mit  $B = T^{-1} \cdot T' + T^{-1}AT$ .

Kommentar:  $1 = TT^{-1} \rightsquigarrow T'T^{-1} + T(T^{-1})' = 0$   
 $1 = T^{-1}T \rightsquigarrow (T^{-1})'T + T^{-1}T' = 0$

**Proposition 2.19.** [[Sch](#), Prop 4.1.1] Seien  $(\mathcal{M}, \partial_{\mathcal{M}})$  und  $(\mathcal{N}, \partial_{\mathcal{N}})$  Meromorphe Zusammenhänge. Durch setzen von

$$\partial(m \otimes n) = \partial_{\mathcal{M}}(m) \otimes n + m \otimes \partial_{\mathcal{N}}(n)$$

als die Wirkung von  $\partial$  auf das  $K$ -Modul  $\mathcal{M} \otimes_K \mathcal{N}$ , wird  $(\mathcal{M} \otimes_K \mathcal{N}, \partial)$  zu einem Meromorphen Zusammenhang.

Beweis. Klar □

**Lemma 2.20.** [[Sab90](#), Ex 5.3.7] Falls  $\mathcal{N}$  regulär und nicht Null, dann ist die Menge der Slopes von  $\mathcal{M} \otimes \mathcal{N}$  genau die Menge der Slopes von  $\mathcal{M}$ .

Beweis. TODO □

## 2.3 Newton Polygon

Kommentar: Quelle: sabbah?  
 sabbah mach alles formal, barbara mach alles konvergent

Jedes  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ , also insbesondere auch jedes  $P \in \mathcal{D}_K$ , lässt sich eindeutig als

$$P = \sum_{k=0}^n a_k(x) \partial_x^k = \sum_{k=0}^n \left( \sum_{l=-N}^{\infty} \alpha_{kl} x^l \right) \partial_x^k$$

mit  $\alpha_{ml} \in \mathbb{C}$  schreiben. Betrachte das zu  $P$  dazugehörige

$$\begin{aligned} H(P) &:= \bigcup_{m,l \text{ mit } \alpha_{ml} \neq 0} \left( (m, l - m) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2 \\ &= \bigcup_{m \text{ mit } a_m \neq 0} \left( (m, \deg(a_m) - m) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2. \end{aligned}$$

**Definition 2.21.** Das Randpolygon der konvexen Hülle  $\text{conv}(H(P))$  von  $H(P)$  heißt das *Newton Polygon* von  $P$  und wird als  $N(P)$  geschrieben.

*Bemerkung 2.22.* Claude Sabbah definiert das Newton-Polygon in [Sab90, 5.1] auf eine andere Weise. Er schreibt

$$P = \sum_k a_k(x)(x\partial_x)^k$$

mit  $a_k(x) \in \mathbb{C}\{x\}$  und definiert das Newton-Polygon als das Randpolygon der konvexe Hülle von

$$H'(P) := \bigcup_{m \text{ mit } a_m \neq 0} \left( (m, \deg(a_m)) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2.$$

**Definition 2.23.** Die Menge  $\text{slopes}(P)$  sind die nicht-vertikalen Steigungen von  $N(P)$ , die sich echt rechts von  $\{0\} \times \mathbb{R}$  befinden.

- Schreibe  $\mathcal{P}(\mathcal{M})$  für die Menge der zu  $\mathcal{M}$  gehörigen slopes.
- $P$  heißt *regulär* oder *regulär singular*  $:\Leftrightarrow \text{slopes}(P) = \{0\}$  oder  $\deg P = 0$ , sonst *irregulär singular*.
- Ein meromorpher Zusammenhang  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  (bzw.  $\mathcal{M}_K$ ) heißt regulär singular, falls es ein regulär singuläres  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$  (bzw.  $P \in \mathcal{D}_K$ ) gibt, mit  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$  (bzw.  $\mathcal{M}_K \cong \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P$ ).

**Beispiel 2.24.** 1. Ein besonders einfaches Beispiel ist  $P_1 = x^{\textcolor{red}{1}}\partial_x^{\textcolor{blue}{2}}$ . Es ist leicht abzulesen, dass

$$\textcolor{blue}{m} = 2 \qquad \qquad \qquad \textcolor{red}{l} = 1$$

so dass

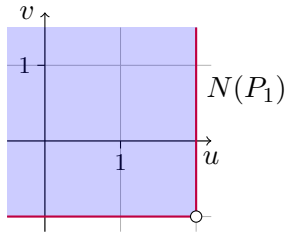
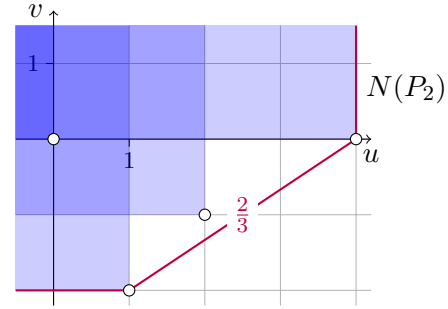
$$H(P_1) = \left( (\textcolor{blue}{2}, \textcolor{red}{1} - \textcolor{blue}{2}) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) = \{(u, v) \in \mathbb{R}^2 | u \leq 2, v \geq -1\}.$$

In Abbildung 2.1 ist  $H(P_1)$  (blau) sowie das Newton Polygon eingezeichnet. Offensichtlich ist  $\text{slopes}(P_1) = \{0\}$  und damit ist  $P_1$  regulär singular.

2. [AV09, Bsp 5.3. 2.] Sei  $P_2 = x^4(x+1)\partial_x^4 + x\partial_x^2 + \frac{1}{x}\partial_x + 1$  so kann man das entsprechende Newton Polygon konstruieren. Das Newton Polygon wurde in Abbildung 2.2 visualisiert. Man erkennt, dass  $\mathcal{P}(P_2) = \{0, \frac{2}{3}\}$  ist.

*Bemerkung 2.25.* [AV09, Bem 5.4] Für alle  $f \in \mathbb{C}(\{x\}) \setminus \{0\}$  gilt allgemein, dass das zu  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$  gehörige Newton Polygon, bis auf vertikale Verschiebung mit dem von  $f \cdot P$  übereinstimmt.




 Abbildung 2.1: Newton-Polygon zu  $P_1 = x^2 \partial_x^2$ 

 Abbildung 2.2: Newton-Polygon zu  $P_2$ 

*Beweis.* TODO

□

Damit lässt sich das Newton Polygon, durch ein  $f$ , immer so verschieben, dass  $(0, 0) \in N(f \cdot P)$ , und es gilt, dass

$$\mathcal{D}_K \cdot P = \mathcal{D}_K \cdot (f \cdot P) \triangleleft \mathcal{D}_K$$

ist.

**Definition 2.26.** In einem Polynom  $P = \varepsilon x^p \partial_x^q + \sum_{k=0}^n (\sum_{l=-N}^{\infty} \alpha_{kl} x^l) \partial_x^k$ , mit  $\varepsilon, \alpha_{kl} \in \mathbb{C}, p, q \in \mathbb{Z}$  sind die restlichen Monome *Therme im Quadranten* von  $\varepsilon x^p \partial_x^q$ , falls für alle  $k \in \mathbb{N}$  und  $l \in \mathbb{Z}_{\geq -N}$  mit  $\alpha_{kl} \neq 0$  gilt:  $k \leq q$  und  $l - k \geq p - q$ .

*Bemerkung 2.27.* • Anschaulich bedeutet das, dass

$$H(\varepsilon x^p \partial_x^q) = \left( (q, p - q) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \supset \left( (k, l - k) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) = H(\alpha_{kl} x^l \partial_x^k),$$

für alle relevanten  $k$  und  $l$ .

- Sei  $P$  ein Polynom, bei dem alle Koeffizienten im Quadranten von  $\varepsilon x^p \partial_x^q$  sind, dann gilt:

$$\begin{aligned} H(P) &= H(\varepsilon x^p \partial_x^q + \sum_{k=0}^n (\sum_{l=-N}^{\infty} \alpha_{kl} x^l) \partial_x^k) \\ &= H(\varepsilon x^p \partial_x^q + \text{T.i.Q. von } x^p \partial_x^q) \\ &= H(\varepsilon x^p \partial_x^q) \\ \Rightarrow N(P) &= N(\varepsilon x^p \partial_x^q). \end{aligned}$$

Also können Terme, die sich bereits im Quadranten eines anderen Terms befinden und nicht der Term selbst sind, vernachlässigt werden, wenn das Newton-Polygon gesucht ist. Das **T.i.Q.** ist eine hier Abkürzung für Terme im Quadranten.

Kommentar:

**Beispiel 2.28.**

$$(x^a \partial_x^b)^c = x^{ac} \partial_x^{bc} + \text{T.i.Q. von } x^{ac} \partial_x^{bc}$$

und somit gilt

$$\begin{aligned} N((x^a \partial_x^b)^c) &= N(x^{ac} \partial_x^{bc} + \text{T.i.Q. von } x^{ac} \partial_x^{bc}) \\ &= N(x^{ac} \partial_x^{bc}) \end{aligned}$$

**Lemma 2.29.** [Sab90, Seite 26] Das Newton-Polygon hängt, bis auf vertikales verschieben, nur von dem assoziierten Meromorphen Zusammenhang ab.

Kommentar: ODER: assoziierte Meromorphen Zusammenhänge haben gleiche Slopes aber sind möglicherweise vertikal verschoben.

**Lemma 2.30.** [Sab90, 5.1]

1.  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_K)$  ist nicht Leer, wenn  $\mathcal{M}_K \neq \{0\}$
2. Wenn man eine exakte Sequenz  $0 \rightarrow \mathcal{M}'_K \rightarrow \mathcal{M}_K \rightarrow \mathcal{M}''_K \rightarrow 0$  hat, so gilt  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_K) = \mathcal{P}(\mathcal{M}'_K) \cup \mathcal{P}(\mathcal{M}''_K)$ .

Kommentar: Siehe auch [Sab90, Thm 5.3.4]

Dort Steht:

Wir erhalten die Exakte Sequenz

$$0 \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_1 \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_2 \rightarrow 0$$

**Korollar 2.31.** [Sab90, Thm 5.3.4]  $\mathcal{P}(P) = \mathcal{P}(P_1) \cup \mathcal{P}(P_2)$  und  $\mathcal{P}(P_1) \cap \mathcal{P}(P_2) = \emptyset$

**Satz 2.32.** [Sab90, Thm 5.3.1] [AV09, 5.15] Sei  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ein formaler Meromorpher Zusammenhang und sei  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda_1, \dots, \Lambda_r\}$  die Menge seiner slopes. Es existiert eine (bis auf Permutation) eindeutige Zerlegung

$$\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \bigoplus_{i=1}^r \mathcal{M}_{\widehat{K}}^{(i)}$$

in formale Meromorphe Zusammenhänge mit  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}^{(i)}) = \{\Lambda_i\}$ .

*Beweis.* [Sab90, Thm 5.3.1] oder [AV09, 5.15] □

**Beispiel 2.33.** [Sab90, Ex 5.3.6] Sei  $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$ . So sieht das Newton-Polygon wie folgt aus

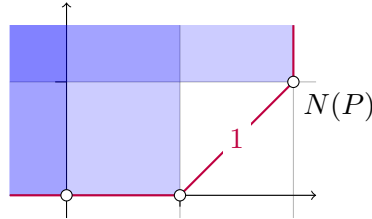


Abbildung 2.3: Newton Polygon zu  $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$

mit den Slopes  $\mathcal{P}(P) = \{0, 1\} =: \{\Lambda_1, \Lambda_2\}$ . Nach dem Satz 2.32 existiert eine Zerlegung  $P = P_1 \cdot P_2$  mit  $\mathcal{P}(P_1) = \{\Lambda_1\}$  und  $\mathcal{P}(P_2) = \{\Lambda_2\}$ . Durch scharfes hinsehen erkennt man, dass

$$\begin{aligned} P &= x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &\dots \\ &= (x(x\partial_x) + \dots) \cdot (x\partial_x + \dots) \\ &\dots \\ &= P_1 \cdot P_2 \end{aligned}$$

Kommentar:

**anders geschrieben**

$$\begin{aligned} P &= x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= xx\partial_x x\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^2(x\partial_x + 1)\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^3\partial_x^2 + x^2\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^3\partial_x^2 + (x^2 + x)\partial_x + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

So sieht das Newton-Polygon wie folgt aus

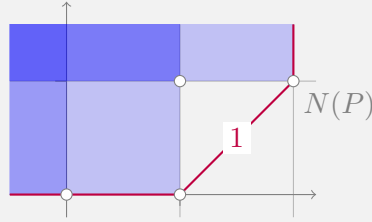


Abbildung 2.4: Newton Polygon zu  $P$

**Korollar 2.34.** [Sab90, Cor 5.2.6] Falls  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ein regulärer formaler Meromorpher Zusammenhang ist, dann ist  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  isomorph zu einer direkten Summe von elementaren formalen Zusammenhängen. Wobei die elementaren formalen Zusammenhänge die sind, die zu passendem  $\mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (x\partial_x - \alpha)^p$  isomorph sind.

### 2.3.1 Die Filtrierung ${}^\ell V\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ und das $\ell$ -Symbol

Kommentar: TODO: mache alle Linearform  $L$  zu  $\ell$

Sei  $\Lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \in \mathbb{Q}_{\geq 0}$  vollständig gekürzt, also mit  $\lambda_0$  und  $\lambda_1$  in  $\mathbb{N}$  relativ prim. Definiere die Linearform  $\ell(s_0, s_1) = \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1$  in zwei Variablen. Sei  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ . Falls  $P = x^a \partial_x^b$  mit  $a \in \mathbb{Z}$  und  $b \in \mathbb{N}$  setzen wir

$$\text{ord}_\ell(P) = \ell(b, b - a)$$

und falls  $P = \sum_{i=0}^d b_i(x) \partial_x^i$  mit  $b_i \in \widehat{K}$  setzen wir

$$\text{ord}_\ell(P) = \max_{\{i | a_i \neq 0\}} \ell(i, i - v(b_i)).$$

**Definition 2.35** (Die Filtrierung  ${}^\ell V\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ ). [Sab90, Seite 25] Nun können wir die aufsteigende Filtration  ${}^\ell V\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ , welche mit  $\mathbb{Z}$  indiziert ist, durch

$${}^\ell V_\lambda \mathcal{D}_{\widehat{K}} := \{P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}} \mid \text{ord}_\ell(P) \leq \lambda\}$$

definieren.

*Bemerkung 2.36.* Man hat  $\text{ord}_\ell(PQ) = \text{ord}_\ell(P) + \text{ord}_\ell(Q)$  und falls  $\lambda_0 \neq 0$  hat man auch, dass  $\text{ord}_\ell([P, Q]) \leq \text{ord}_\ell(P) + \text{ord}_\ell(Q) - 1$ .

**Definition 2.37** ( $\ell$ -Symbol). [Sab90, Seite 25] Falls  $\lambda_0 \neq 0$  ist der graduierte Ring  $gr^{\ell V} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \stackrel{\text{def}}{=} \bigoplus_{\lambda \in \mathbb{Z}} gr_{\lambda}^{\ell V} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$  ein kommutativer Ring. Bezeichne die Klasse von  $\partial_x$  in dem Ring durch  $\xi$ , dann ist der Ring isomorph zu  $\widehat{K}[\xi]$ . Sei  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ , so ist  $\sigma_{\ell}(P)$  definiert als die Klasse von  $P$  in  $gr_{\text{ord}_{\ell}(P)}^{\ell V} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ .  $\sigma_{\ell}$  wir hierbei als das  $\ell$ -Symbol Bezeichnet.

Zum Beispiel ist  $\sigma_{\ell}(x^a \partial_x^b) = x^a \xi^b$ .

*Bemerkung 2.38.* Bei [Sab90] wird der Buchstabe  $L$  anstatt  $\ell$  für Linearformen verwenden, dieser ist hier aber bereits für  $\mathbb{C}[[t]]$  reserviert. Dementsprechend ist die Filtrierung dort als  ${}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$  und das  $\ell$ -Symbol als  $L$ -Symbol zu finden.

*Bemerkung 2.39.* Ist  $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$  geschrieben als  $P = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} x^j \partial_x^i$ . So erhält man  $\sigma_{\ell}(P)$  durch die Setzung

$$\sigma_{\ell}(P) = \sum_{\{(i,j) | \ell(i, i-j) = \text{ord}_{\ell}(P)\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i.$$

*Beweis.*

□

**Kommentar:** Ich will die Linearform vermeiden und direkt die skalare Steigung verwenden

**Definition 2.40** (Stützfunktion). Die Funktion

$$\omega_P : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}, \omega_P(t) := \inf\{v - tu \mid (u, v) \in N(P)\}$$

heißt Stützfunktion und wird in [AV09] als Alternative zu dieser Ordnung verwendet.

*Bemerkung 2.41.* Wenn  $\ell(x_0, s_1)$  wie oben aus  $\Lambda$  entstanden ist, so gilt

$$\omega_P(\Lambda) = \text{ord}_{\ell}(P).$$

**Kommentar:** TODO: ist  $\ell$  Slope (gehört zu Slope) dann hat  $\sigma_{\ell}(P)$  zumindest 2 Monome

## 2.4 Formale Struktur regulärer Zusammenhänge

[Sab90, Chap 5.2] Sei  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ein regulärer formaler Meromorpher Zusammenhang.

**Lemma 2.42.** [Sab90, Lem 5.2.1.] *Es existiert eine Basis von  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  über  $\widehat{K}$  mit der Eigenschaft, dass die Matrix, die  $x\partial_x$  beschreibt, nur Einträge in  $\mathbb{C}[[x]]$  hat.*

*Beweis.* Wähle einen zyklischen Vektor  $m \in \mathcal{M}_{\widehat{K}}$  und betrachte die Basis  $m, \partial_x m, \dots, \partial_x^{d-1} m$  (siehe Lemma 2.7). Schreibe  $\partial_x^d m = \sum_{i=0}^{d-1} (-b_i(x)) \partial_x^i m$  in Basisdarstellung mit Koeffizienten  $b_i \in \widehat{K}$ . Also erfüllt  $m$  die Gleichung  $\partial_x^d m + \sum_{i=0}^{d-1} b_i(x) \partial_x^i m = 0$ .

Kommentar: bis hier schon klar

Tatsächlich kann man  $b_i(x) = x^i b'_i(x)$  mit  $b'_i \in \mathbb{C}[[x]]$  schreiben (wegen Regularität).

Dies impliziert, dass  $m, x\partial_x m, \dots, (x\partial_x)^{d-1} m$  ebenfalls eine Basis von  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ist.

Die Matrix von  $x\partial_x$  zu dieser neuen Basis hat nur Einträge in  $\mathbb{C}[[x]]$ . □

**Lemma 2.43.** [Sab90, Lem 5.2.2.] *Es existiert sogar eine Basis von  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  über  $\widehat{K}$  so dass die Matrix zu  $x\partial_x$  konstant ist.*

*Beweis.* TODO □

## 2.5 pull-back und push-forward

Kommentar: TODO: Variable zu x machen

Nach [Sab07, 1.a] und [HTT07, 1.3]. Sei

$$\rho : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, t \mapsto x := \rho(t) \quad \in t\mathbb{C}[[t]]$$

mit Bewertung  $p \geq 1$ .

Kommentar: TODO: muss das ein Homomorphismus sein? [Cou95, Seite 130]

Hier werden wir immer  $\rho(t) = t^p$  für ein  $p \in \mathbb{N}$  betrachten. Diese Funktion induziert eine Abbildung

$$\rho^* : \mathbb{C}\{x\} \hookrightarrow \mathbb{C}\{t\}, f \mapsto f \circ \rho \quad \text{bzw.} \quad \rho^* : \mathbb{C}[[x]] \hookrightarrow \mathbb{C}[[t]], f \mapsto f \circ \rho$$

analog erhalten wir

$$\rho^* : K \hookrightarrow L := \mathbb{C}(\{t\}), f \mapsto f \circ \rho \quad \text{bzw.} \quad \rho^* : \widehat{K} \hookrightarrow \widehat{L} := \mathbb{C}((t)), f \mapsto f \circ \rho$$

wobei  $L$  (bzw.  $\widehat{L}$ ) eine endliche Körpererweiterung von  $K$  (bzw.  $\widehat{K}$ ) ist.

Kommentar: TODO: damit wird  $\widehat{L}$  zu einem  $\widehat{K}$  Vektorraum.

Sei  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ein endlich dimensionaler  $\mathbb{C}((t))$  Vektorraum ausgestattet mit einem Zusammenhang  $\nabla$ .

**Definition 2.44** (pull-back). [Sab07, 1.a] und [Sab90, Page 34] Der *pull-back* oder das *Inverses Bild*  $\rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  von  $(\mathcal{M}_{\widehat{K}}, \nabla)$  ist der Vektorraum

$$\rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}} := \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}((t)) \otimes_{\mathbb{C}((x))} \mathcal{M}_{\mathbb{C}((x))}$$

mit dem *pull-back Zusammenhang*  $\rho^*\nabla$  definiert durch

$$\partial_t(1 \otimes m) := \rho'(t) \otimes \partial_x m. \quad (2.3)$$

Für ein allgemeines  $\varphi \otimes m \in \rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  gilt somit

$$\partial_t(\varphi \otimes m) := \rho'(t)(\varphi \otimes \partial_x m) + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \otimes m. \quad (2.4)$$

**Wie sieht die Wirkung der Derivation auf dem pull-back Zusammenhang aus?** Betrachte ein Element der Form  $f(t)m = f(\rho(u))m \in \rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  dann gilt

$$\begin{aligned} \partial_t(f(t)m) &= \partial_{\rho(u)}(f(\rho(u))m) \\ &= f'(\rho(u)) \cdot \underbrace{\frac{\partial(f(u))}{\partial(f(u))}}_{=1} m + f(\rho(u)) \underbrace{\partial_{\rho(u)} m}_{=\partial_t} = (\star) \end{aligned}$$

$$\rho'(u)^{-1} \partial_u(f(t)m) = \frac{1}{pu^{p-1}} \partial_u(f(u^p)m)$$

$$= f'(u^p)m + f(u^p)\frac{1}{pu^{p-1}}\partial_u m = (\star)$$

Also gilt  $\partial_t(f(t)m) = \rho'(u)^{-1}\partial_u(f(t)m)$  und somit lässt sich vermuten, dass die Wirkung von  $\partial_t$  gleich der Wirkung von  $\rho'(u)^{-1}\partial_u$  ist. In der Tat stimmt diese Vermutung, wie das folgende Lemma zeigt.

**Lemma 2.45.** *In der Situation von Lemma 2.44, mit  $\mathcal{M}_{\hat{K}} = \mathcal{D}_{\hat{K}}/\mathcal{D}_{\hat{K}} \cdot P(x, \partial_x)$  für ein  $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_{\hat{K}}$ , gilt*

$$\rho^*\mathcal{M}_{\hat{K}} \cong \mathcal{D}_{\hat{L}}/\mathcal{D}_{\hat{L}} \cdot P(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t).$$

*Kommentar:* also wird der Übergang beschrieben durch

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \rho(t) \\ \partial_x &\rightarrow \rho'(t)^{-1}\partial_t \end{aligned}$$

*Kommentar:* [Cou95, Seite 130] Holonomic modules are preserved under this construction.

*Kommentar:* [Sab90, Page 34] Sei  $\mathcal{M}_{\hat{K}}$  ein formaler Meromorpher Zusammenhang. Man definiert  $\pi^*\mathcal{M}_{\hat{K}}$  als den Vektor Raum über  $\hat{L} : \pi^*\mathcal{M}_{\hat{K}} = \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{M}_{\hat{K}}$ . Dann definiert man die Wirkung von  $\partial_t$  durch:  $t\partial_t \cdot (1 \otimes m) = q(1 \otimes (x\partial_x \otimes m))$  und damit

$$t\partial_t \cdot (\varphi \otimes m) = q(\varphi \otimes (x\partial_x \cdot m)) + ((t\frac{\partial\varphi}{\partial t}) \otimes m).$$

Man erhält damit die Wirkung von  $\partial_t = t^{-1}(t\partial_t)$ .

Für den Beweis von Lemma 2.45 werden zunächst zwei kleine Lemmata bewiesen.

**Lemma 2.46.** *Es gilt  $\rho^*\mathcal{D}_{\hat{K}} = \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{D}_{\hat{K}} \cong \mathcal{D}_{\hat{L}}$  mittels*

$$\begin{aligned} \Phi : \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{D}_{\hat{K}} &\xrightarrow{\cong} \mathcal{D}_{\hat{L}} \\ f(t) \otimes m(x, \partial_x) &\longmapsto f(t)m(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t) \end{aligned}$$



*Beweis.*

□

Kommentar:

*Bemerkung 2.47.* BENÜTZT BEREITS DAS NÄCHSTE LEMMA...

Das soeben, in Lemma 2.46, definierte  $\Phi$  erfüllt für Elementartensoren  $1 \otimes m \in \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{D}_{\hat{K}}$

$$\begin{aligned} \partial_u(1 \otimes m) &\stackrel{\text{def}}{=} \rho'(t) \otimes \partial_x m \\ &\stackrel{\Phi}{\mapsto} \underbrace{\rho'(t) \rho'(t)^{-1}}_{=1} \partial_t m(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \\ &= \partial_t m(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \end{aligned}$$

und somit (2.3) wie gewollt.

**Lemma 2.48.** *Sei  $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_K$ . In der Situation*

$$\begin{array}{ccc} \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{D}_{\hat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes \_ \cdot P(t, \partial_t)} & \hat{L} \otimes_{\hat{K}} \mathcal{D}_{\hat{K}} \\ \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi \\ \mathcal{D}_{\hat{L}} & \xrightarrow{\alpha} & \mathcal{D}_{\hat{L}} \end{array}$$

mit  $\Phi$  wie in Lemma 2.46 macht  $\alpha := \_ \cdot P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$  das Diagramm kommutativ.

*Beweis.* TODO

□

zu Lemma 2.45. Sei  $P \in \mathcal{D}_{\hat{K}}$  und  $\mathcal{M}_{\hat{K}} := \mathcal{D}_{\hat{K}} / \mathcal{D}_{\hat{K}} \cdot P$ . Wir wollen zeigen, dass

$$\rho^* \mathcal{M}_{\hat{K}} \stackrel{!}{\cong} \mathcal{D}_{\hat{L}} / \mathcal{D}_{\hat{L}} \cdot Q$$

für  $Q = P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$  gilt. Betrachte dazu die kurze Sequenz

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \mathcal{D}_{\hat{K}} & \xrightarrow{\_ \cdot P} & \mathcal{D}_{\hat{K}} & \xrightarrow{\pi_{\hat{K}}} & \mathcal{M}_{\hat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & u \longmapsto & u \cdot P & & & \\ & & & & u \longmapsto & u \bmod \mathcal{D}_{\hat{K}} \cdot P & \end{array}$$

ist **exact**, weil  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P = \text{coker}(\_ \cdot P)$ . Weil  $\widehat{K}$  **flach** ist, da Körper, ist auch, nach anwenden des Funktors  $\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \_$ , die Sequenz

$$0 \longrightarrow \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \xrightarrow{\text{id} \otimes \_ \cdot P} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \xrightarrow{\text{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0$$

$$\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \parallel$$

exact. Deshalb ist

$$\begin{aligned} \rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} &\cong \text{coker}(\text{id} \otimes \_ \cdot P) && (\text{weil exact}) \\ &\cong \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \left( (\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}}) \cdot (\text{id} \otimes \_ \cdot P) \right) && (\text{nach def. von coker}) \end{aligned}$$

Also mit  $\Phi$  wie in Lemma 2.46 und  $Q(t, \partial_t) := P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$  nach Lemma 2.48 ergibt sich

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes \_ \cdot P} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi & & \\ & & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{\_ \cdot Q} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & & \end{array}$$

als kommutatives Diagram. Nun, weil  $\_ \cdot Q$  injektiv ist, lässt sich die untere Zeile zu einer exacten Sequenz fortsetzen

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes \_ \cdot P} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi & & \\ 0 & \longrightarrow & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{\_ \cdot Q} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{\pi_{\widehat{L}}} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q \longrightarrow 0 \end{array}$$

und damit folgt die Behauptung.

Kommentar: Quelle?

Kommentar:

- warum sind die schon zusammenhänge isomorph?  
eventuell noch ein Lemma bei kurzen exacten Sequenzen hinzufügen

□

**Lemma 2.49.** [Sab90, 5.4.3] Sei  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda_1, \dots, \Lambda_r\}$  die Menge der Slopes von  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  und  $\rho : t \mapsto x := t^p$ , dann gilt für  $\mathcal{P}(\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda'_1, \dots, \Lambda'_r\}$ , dass  $\Lambda'_n = p \cdot \Lambda_n$ .

*Beweis.* Sei  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$  mit  $P = \sum a_i(x) \partial_x^i$ , dann ist  $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P'$  mit

$$\begin{aligned} P'(t, \partial_t) &= P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \\ &= \sum a_i(\rho(t)) (\rho'(t)^{-1} \partial_t)^i \\ &= \sum a_i(t^p) ((p \cdot t^{p-1})^{-1} \partial_t)^i \end{aligned}$$

Kommentar: TODO: Hier weiter...

□

**Beispiel 2.50** (pull-back). Hier nun ein explizit berechneter pull-back. Wir wollen  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} := \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$  bzgl.  $P := x^3 \partial_x^2 - 4x^2 \partial_x - 1$  betrachten. Unser Ziel ist es hier ganzzahlige slopes zu erhalten. Es gilt  $\text{slopes}(P) = \{\frac{1}{2}\}$  (siehe Abbildung 2.5) und es ist 2 der Hauptnenner aller Slopes. Wende den pull-back mit  $\rho : t \rightarrow x := t^2$  an. Zunächst ein paar Nebenrechnungen, damit wir Lemma 2.45 einfacher anwenden können.

$$\begin{aligned} \partial_x &\rightarrow \frac{1}{\rho'(t)} \partial_t = \frac{1}{2t} \partial_t \\ \partial_x^2 &\rightarrow \left(\frac{1}{2t} \partial_t\right)^2 \\ &= \frac{1}{2t} \partial_t \left(\frac{1}{2t} \partial_t\right) \\ &= \frac{1}{2t} \left(-\frac{1}{2t^2} \partial_t + \frac{1}{2t} \partial_t^2\right) \\ &= \frac{1}{4t^2} \partial_t^2 - \frac{1}{4t^3} \partial_t \end{aligned}$$

also ergibt einsetzen

$$\begin{aligned} \rho^+ P &= t^6 \left(\frac{1}{4t^2} \partial_t^2 - \frac{1}{4t^3} \partial_t\right) - 4t^4 \frac{1}{2t} \partial_t - 1 \\ &= \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - t^3 \frac{1}{4t^3} \partial_t - 4t^3 \frac{1}{2} \partial_t - 1 \\ &= \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - 2 \frac{1}{4} t^3 \partial_t - 1 \end{aligned}$$

Also ist  $\rho^+ P = \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1$  mit  $\text{slopes}(\rho^+ P) = \{1\}$  (siehe Abbildung 2.6) und somit  $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1)$ .

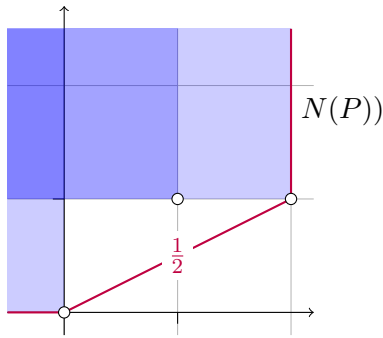


Abbildung 2.5: Newton Polygon zu  
 $P = x^3 \partial_x^2 - 4x^2 \partial_x - 1$

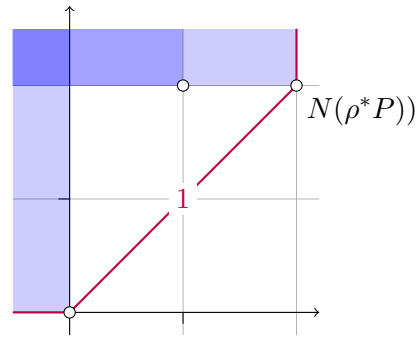
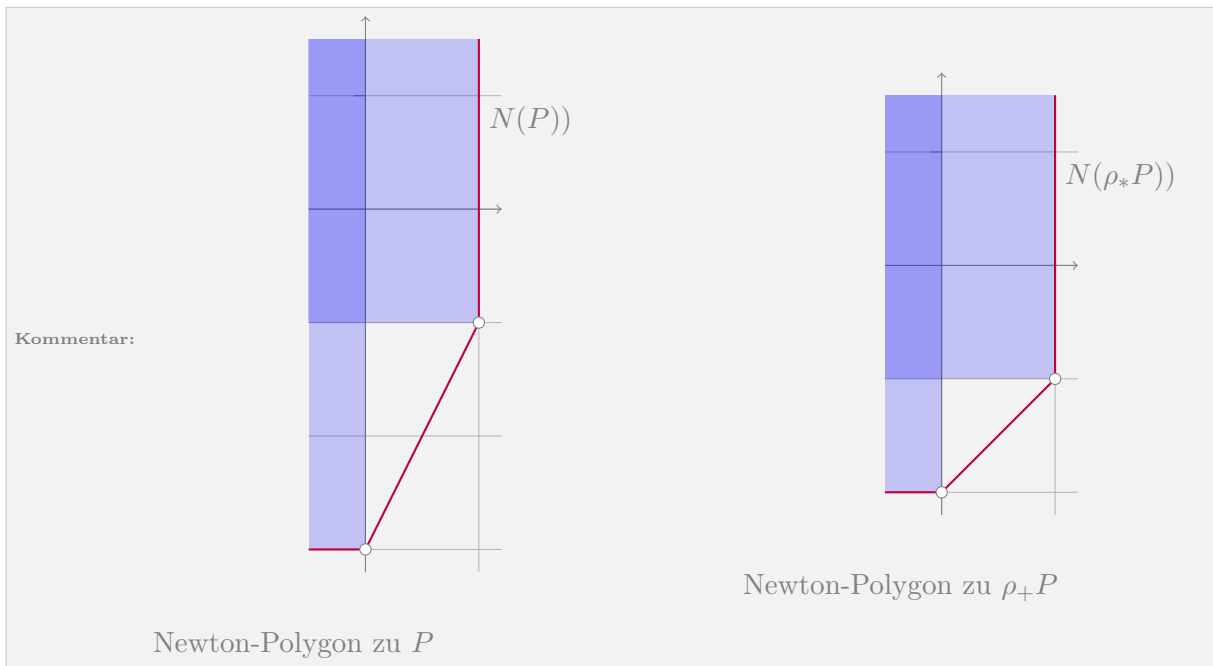


Abbildung 2.6: Newton Polygon zu  
 $\rho^+ P = \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1$

Sei  $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$  ein endlich dimensionaler  $\widehat{L}$ -VR mit Verknüpfung, so definiere den push-forward wie folgt.

**Definition 2.51** (push-forward). [Sab07, 1.a] Der *push-forward* oder das *Direktes Bild*  $\rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}}$  von  $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$  ist

- der  $\widehat{K}$ -VR  $\rho_* \mathcal{N}$  ist definiert als der  $\mathbb{C}$ -Vektor Raum  $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$  mit der  $\widehat{K}$ -Vektor Raum Struktur durch die skalare Multiplikation  $\cdot : \widehat{K} \times \mathcal{N}_{\widehat{L}} \rightarrow \mathcal{N}_{\widehat{L}}$  und  
 $(f(x), m) \mapsto f(x) \cdot m := f(\rho(t))m$
- mit der Wirkung  $\partial_x$  beschrieben durch  $\rho'(t)^{-1} \partial_t$ .



**Beispiel 2.52** (push-forward). Für  $\rho : t \rightarrow u^2$ ,  $\varphi = \frac{1}{u^2}$  betrachte

$$\begin{aligned}\mathcal{E}^\varphi &\cong \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot (\partial_u + \partial_u \frac{1}{u^2}) \\ &= \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot \underbrace{(\partial_u + \frac{2}{u^3})}_{=: P}\end{aligned}$$

mit  $\text{slopes}(P) = \{2\}$  (siehe Abbildung 2.5). Bilde nun das Direkte Bild über  $\rho$ , betrachte dazu

$$\begin{aligned}\partial_u + \frac{2}{u^3} &= 2u(\frac{1}{2u}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \\ &= 2u(\rho'(u)^{-1}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \\ &= 2u(\partial_t + \frac{1}{t^2})\end{aligned}$$

Also ist  $\rho_+\mathcal{E}^\varphi \cong \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot (\partial_t + \frac{1}{t^2})$  mit  $\rho_+P = \partial_t + \frac{1}{t^2}$  und  $\text{slopes}(\rho_+P) = \{1\}$  (siehe Abbildung 2.5)

**Satz 2.53.** [Sab07, 1.a] Es gilt die Projektionsformel

$$\rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}) \cong \rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}. \quad (2.5)$$

*Beweis.*

$$\begin{aligned}\rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}) &= \rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} (\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{L}})) && \text{(def von } \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}} \text{)} \\ &\cong \rho_+((\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \widehat{L}) \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}) && \text{(Rechenregeln Tensorprodukt)} \\ &\cong \rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}) && \text{(Rechenregeln Tensorprodukt)} \\ &= \rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} && (?)\end{aligned}$$

□

**Kommentar:** Sei  $\rho(u) = u^p = t$  und  $\varphi(t)$  gegeben.

$$\begin{aligned}\rho^+ \mathcal{E}^{\varphi(t)} &= \mathcal{E}^{\varphi(\rho(u))} = \mathcal{E}^{\varphi(u^p)} \\ \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} &= \bigoplus_{\zeta \in \mu_p} \mathcal{E}^{\varphi(\zeta \cdot u)}\end{aligned}$$

## 2.6 Fouriertransformation

**Definition 2.54** (Fouriertransformation). [Blo04, Def 3.1] [GL04] [AV09, Def 6.1] Sei  $P = \sum_{i=0}^d a_i(x) \partial_x^i$ . Dann ist die *Fouriertransformierte* von  $P$  gegeben durch

$$\mathcal{F}_P := \mathcal{F}_P(z, \partial_z) = \sum_{i=0}^d a_i(\partial_z) (-z)^i$$

**Definition 2.55** (Fouriertransformation von lokalisierten holonomen D-Moduln). Ist  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{K}/\widehat{K} \cdot P$  so ist die Fouriertransformierte davon  ${}^{\mathcal{F}}\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{K}/\widehat{K} \cdot \mathcal{F}_P(x, \partial_x)$ .

**Beispiel 2.56.** Sei  $P = t^2 \partial_t + 1$  dann ist die Fouriertransformierte davon  $\mathcal{F}_P = \dots$

Kommentar: TODO: hier weiter

### 3 Elementare Meromorphe Zusammenhänge

Kommentar: einführen als Bausteine oder kleinste Meromorphe Zusammenhänge

**Definition 3.1.** [Sab07, 1.a] Sei  $\varphi \in \widehat{K}$ . Wir schreiben  $\mathcal{E}_K^\varphi$  für den (formalen) Rang 1 Vektorraum  $\mathbb{C}((x)) \stackrel{\text{def}}{=} \widehat{K}$  ausgestattet mit dem Zusammenhang  $\nabla = \partial_x + \partial_x \varphi$ , im speziellen also  $\nabla_{\partial_x} 1 = \partial_x 1 = \varphi'$ .

*Bemerkung 3.2.*

1. Es für ein allgemeines  $f(x) \in \mathcal{E}_K^\varphi$  gilt  $\partial_x f(x) = f'(x) + f(x)\varphi'(x)$ .
2. Auf die Angabe von des Rang 1 Vektorraums im Subscript wird im folgendem meist verzichtet.
3. Offensichtlich ist  $\mathcal{E}^\varphi \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\partial_x - \varphi'(x))$ , weil für den zyklischen Vektor 1 gilt, dass  $\partial_x \cdot 1 = \varphi'(x) \cdot 1$ .

*Bemerkung 3.3.* [Sab07, 1.a] Es gilt  $\mathcal{E}^\varphi \cong \mathcal{E}^\psi$  genau dann wenn  $\varphi \equiv \psi \pmod{\mathbb{C}[[x]]}$ .

Kommentar:

**Lemma 3.4** (Slope von  $\mathcal{E}^\varphi$ ). *TODO*

Sei  $\rho : t \mapsto x := t^p$  und  $\mu_\xi : t \mapsto \xi t$ .

**Lemma 3.5.** [Sab07, Lem 2.4] Für alle  $\varphi \in \widehat{L}$  gilt

$$\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^\varphi = \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi}.$$

*Beweis.* Wir wollen zeigen, dass das folgende Diagram, für einen passenden Isomorphismus, kommutiert:

$$\begin{array}{ccc}
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xrightarrow{\cong} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \\
 \downarrow \partial_t & & \downarrow \partial_t \\
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xrightarrow{\cong} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi}
 \end{array}$$

Es sei oBdA  $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$ , dies ist nach Bemerkung 3.3 berechtigt. Wir wählen eine  $\widehat{L}$  Basis  $e$  des Rang 1  $\widehat{L}$ -Vektorraum  $\mathcal{E}^\varphi$  und damit erhält man die Familie  $e, te, \dots, t^{p-1}e$  als  $\widehat{K}$ -Basis von  $\rho_+ \mathcal{E}^\varphi$ .

Durch die Setzung  $e_k := t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e$  wird die Familie  $\mathbf{e} := (e_0, \dots, e_{p-1})$  eine  $\widehat{L}$ -Basis von  $\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^\varphi$ .

Zerlege nun  $t\varphi'(t) = \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) \in t^{-2}\mathbb{C}[t^{-1}]$  mit  $\psi_j \in \mathbb{C}[x^{-1}]$  für alle  $j > 0$  und  $\psi_0 \in x^{-1}\mathbb{C}[x^{-1}]$  (siehe: Anhang A). Es gilt:

$$t\partial_t e_k = \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p}$$

denn:

$$\begin{aligned}
 t\partial_t e_k &= t\partial_t(t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e) \\
 &= t(-kt^{-k-1} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + pt^{p-1} \cdot t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} \underbrace{\partial_x(t^k e)}_{\in \rho_+ \mathcal{E}^\varphi}) \\
 &= -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + pt^{p-1} t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (pt^{p-1})^{-1} (kt^{k-1} e + t^k \varphi'(t) e) \\
 &= -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (kt^{k-1} e + t^k \varphi'(t) e) \\
 &= \underbrace{-kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} kt^{k-1} e}_{=0} + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} t^k \varphi'(t) e \\
 &= t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^{k+1} \varphi'(t) e \\
 &= \sum_{i=0}^{p-1} t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k \underbrace{t^i \psi_i(t^p)}_{\in \widehat{K}} e \\
 &= \sum_{i=0}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) (t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e) \\
 &= \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p}
 \end{aligned}$$

Sei

$$V := \begin{pmatrix} 0 & & & 1 \\ 1 & 0 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



so dass  $\mathbf{e} \cdot V = (e_1, \dots, e_{p-1}, e_0)$  gilt, so dass gilt:

$$t\partial_t \mathbf{e} = \mathbf{e} \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j V^j \right]$$

denn:

$$\begin{aligned} t\partial_t \mathbf{e} &= (t\partial_t e_0, \dots, t\partial_t e_{p-1}) \\ &= \left( \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p} \right)_{k \in \{0, \dots, p-1\}} \\ &= \mathbf{e} \begin{pmatrix} u^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) & \dots & t^3 \psi_3(t^p) & t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) \\ t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) & & \ddots & t^2 \psi_2(t^p) \\ t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) & \ddots & & t^3 \psi_3(t^p) \\ t^3 \psi_3(t^p) & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) \\ t^{p-2} \psi_{p-2}(t^p) & \dots & t^3 \psi_3(t^p) & t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{e} \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) V^j \right] \end{aligned}$$

Die Wirkung von  $\partial_t$  auf die Basis von  $\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(t)}$  ist also Beschrieben durch

$$\partial_t \mathbf{e} = \mathbf{e} \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j V^j \right].$$

Da  $V$  das Minimalpolynom  $\chi_V(x) = X^p - 1$  hat, können wir diese Matrix durch Passendes  $T$  auf die Form

$$D := TVT^{-1} = \begin{pmatrix} \xi^0 & & & \\ & \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \xi^{p-1} \end{pmatrix},$$

mit  $\xi^p = 1$ , bringen. So dass gilt:

$$\begin{aligned} T \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) V^j \right] T^{-1} &= \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) (TVT^{-1})^j \right] \\ &= \left[ \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) D^j \right] \\ &= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j (\xi^1)^j & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j (\xi^{p-1})^j \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j & & & \\ & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^1)^{j-1} \psi_j \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^{p-1})^{j-1} \psi_j \xi^{p-1} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \varphi'(t) & & & \\ & \varphi'(\xi t) \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \varphi'(\xi^{p-1} t) \xi^{p-1} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Damit wissen wir bereits, das im Diagram

$$\begin{array}{ccccccc}
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xleftarrow{\cong} & \hat{L}^p & \xleftarrow[\cong]{T} & \hat{L}^p & \xrightarrow[\cong]{\Phi} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \\
 \downarrow \partial_t & & \downarrow \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j V^j & & \downarrow \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j D^j & & \downarrow \partial_t \\
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xleftarrow{\cong} & \hat{L}^p & \xleftarrow[\cong]{T} & \hat{L}^p & \xrightarrow[\cong]{\Phi} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi}
 \end{array}$$

(★)

der mit (★) bezeichnete Teil kommutiert. Um zu zeigen, dass alles kommutiert, zeigen wir noch, dass

$$\partial_t(\Phi(x)) = \Phi\left(\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(x) D^j\right) \quad \forall x \in \hat{L}^p$$

gilt.

Kommentar: TODO: zeige das noch

Sei  $x = {}^t(x_1, \dots, x_p) \in \hat{L}^p$ . So ist

$$\partial_t(\Phi(x)) = \partial_t({}^t(\dots))$$

und

$$\Phi\left({}^t x \left(\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) D^j\right)\right) = \Phi\left((x_1, \dots, x_p) \begin{pmatrix} \varphi'(t) & & & \\ & \varphi'(\xi t) \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \varphi'(\xi^{p-1} t) \xi^{p-1} \end{pmatrix}\right)$$

$$= \Phi\left((x_1\varphi'(t), x_2\varphi'(\xi t)\xi, \dots, x_p\varphi'(\xi^{p-1}t)\xi^{p-1})\right)$$

□

**Definition 3.6.** Ein *Elementarer Meromorpher Zusammenhang* ist ein Zusammenhang  $\mathcal{M}$ , für den es  $\psi \in \mathbb{C}((x))$ ,  $\alpha \in \mathbb{C}$  und  $p \in \mathbb{N}$  gibt, so dass

$$\mathcal{M} \cong \mathcal{E}^\psi \otimes R_{\alpha,p},$$

mit  $R_{\alpha,p} := \mathcal{D}/\mathcal{D}(x\partial_x - \alpha)^p$ , ist.

**Lemma 3.7.**  $\mathcal{E}^\psi \otimes R_{\alpha,p} \cong \mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot (x\partial_x - (\alpha + x\frac{\partial\psi}{\partial x}))^p$

*Beweis.* Siehe [Hei10, Lem 5.12]

□

### 3.1 Defnintion in [Sab07]

**Definition 3.8** (Elementarer formaler Zusammenhang). [Sab07, Def 2.1]

**Kommentar:** Alternative. ausführlichere / komplexe definition [Sab90, Def 5.4.5.]

Zu einem gegebenen  $\rho \in t\mathbb{C}[[t]]$ ,  $\varphi \in \widehat{L} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}((t))$  und einem endlich dimensionalen  $\widehat{L}$ -Vektorraum  $R$  mit regulärem Zusammenhang  $\nabla$ , definieren wir den assoziierten Elementaren endlich dimensional  $\widehat{K}$ -Vektorraum mit Zusammenhang, durch:

$$El(\rho, \varphi, R) = \rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes R)$$

[Sab07, nach Def 2.1] Bis auf Isomorphismus hängt  $El(\rho, \varphi, R)$  nur von  $\varphi \bmod \mathbb{C}[[t]]$  ab.

**Lemma 3.9.** [Sab07, Lem 2.2]

**Lemma 3.10.** [Sab07, Lem 2.6.] Es gilt  $El([t \mapsto t^p], \varphi, R) \cong El([t \mapsto t^p], \psi, S)$  genau dann, wenn

- es ein  $\zeta$  gibt, mit  $\zeta^p = 1$  und  $\psi \circ \mu_\zeta \equiv \varphi \bmod \mathbb{C}[[t]]$
- und  $S \cong R$  als  $\widehat{L}$ -Vektorräume mit Zusammenhang.

*Beweis.* Siehe [Sab07, Lem 2.6.]

□

**Proposition 3.11.** [Sab07, Prop 3.1] Jeder irreduzible endlich dimensionale  $\widehat{K}$ -Vektorraum  $\mathcal{M}$  mit Zusammenhang ist isomorph zu  $\rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes L)$ , wobei  $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$ ,  $\rho : t \rightarrow t^p$  vom Grad  $p \geq 1$  und ist minimal unter  $\varphi$ . (siehe [Sab07, Rem 2.8]) und  $L$  ist ein Rang 1  $\widehat{L}$ -Vektorraum mit regulärem Zusammenhang.

*Beweis.* Siehe [Sab07, Prop 3.1] □

## 3.2 Twisten von Meromorphen Zusammenhängen

Kommentar: [Cou95, Chap 5 §2]

**Lemma 3.12.** [Hei10, Seite 44] Sei  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot P(x, \partial_x)$  und sei  $\varphi \in \widehat{K}$ . So gilt

$$\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{E}^\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot Q(x, \partial_x)$$

mit  $Q(x, \partial_x) = P(x, \partial_x - \frac{\partial \varphi}{\partial x})$ .

*Beweis.* TODO □

## 4 Levelt-Turrittin-Theorem

Das Levelt-Turrittin-Theorem ist ein Satz, der hilft, Meromorphe Zusammenhänge in ihre irreduziblen Komponenten zu zerlegen.

### 4.1 Klassische Version

**Satz 4.1.** [Sab90, Thm 5.4.7] *Sie  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  ein formaler Meromorpher Zusammenhang. So gibt es eine ganze Zahl  $p$  so dass der Zusammenhang  $\mathcal{M}_{\widehat{L}} := \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}$ , mit  $\rho : t \mapsto x := t^p$ , isomorph zu einer direkten Summe von formalen elementaren Meromorphen Zusammenhänge ist.*

Der folgende Beweis stammt hauptsächlich aus [Sab90, Seite 35].

*Beweis.* Zum Beweis wird Induktion auf die Lexicographisch geordnetem Paare  $(\dim_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}, \kappa)$  angewendet. Wobei  $\kappa \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  dem größtem Slope von  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ . Es wird  $\kappa = \infty$  gesetzt, falls der größte Slope nicht Ganzzahlig ist.

**Kommentar:** TODO: induktionsanfang und -schritt kennzeichnen

Wir nehmen oBdA an, dass  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  genau einen Slope  $\Lambda$  hat, sonst Teile  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  mittels Satz 2.32 in Meromorphe Zusammenhänge mit je einem Slope und wende jeweils die Induktion an. Mit  $\Lambda =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$  (vollständig gekürzt) Definieren wir die dem Slope entsprechende Linearform  $L(s_0, s_1) := \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1$ . Wir nennen  $\sigma_L(P) \in \widehat{K}[\xi]$  die *Determinanten Gleichung* von  $P$ . Da  $L$  zu einem Slope von  $P$  gehört, besteht  $\sigma_L(P)$  aus zumindest zwei Monomen.

**Kommentar:** and is homogeneous of degree  $\text{ord}_L(P) = 0$  because  $P$  is chosen with coefficients in  $\mathbb{C}[[x]]$ , one of them, being a unit.

Schreibe

$$\sigma_L(P) = \sum_{L(i, i-j) = \text{ord}_L(P)} \alpha_{ij} x^j \xi^i$$

$$= \sum_{L(i,i-j)=0} \alpha_{ij} x^j \xi^i.$$

Sei  $\theta := x^{\lambda_0+\lambda_1} x i^{\lambda_1}$  so können wir

$$\sigma_L(P) = \sum_{k \geq 0} \alpha_k \theta^k$$

schreiben, wobei  $\alpha_0 \neq 0$  ist.

**Erster Fall:**  $\lambda_1 = 1$ . Das bedeutet, dass der Slope ganzzahlig ist. Betrachte die Faktorisierung

$$\sigma_L(P) = \varepsilon \prod_{\beta} (\theta - \beta)^{\gamma_{\beta}}.$$

Wobei  $\varepsilon \in \mathbb{C}$  eine Konstante ist. Sei  $\beta_0$  eine der Nullstellen. So setze  $R(z) := (\beta_0/(\lambda_0+1))z^{\lambda_0+1}$  und betrachte  $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes \mathcal{F}_{\widehat{K}}^R$ .

Kommentar: AB HIER VLT NICHT RICHTIG, nur versuch

Falls  $P(x, \partial_x) \cdot e = 0$  gilt

$$P\left(x, \partial_x - \frac{\partial R(x^{-1})}{\partial x}\right) \cdot e \otimes e(R) = 0$$

und hier haben wir

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(x^{-1})}{\partial x} &= \frac{\partial(\frac{\beta_0}{\lambda_0+1} x^{-(\lambda_0+1)})}{\partial x} \\ &= -\beta_0 x^{-(\lambda_0+2)}. \end{aligned}$$

Schreibe  $P' = P(x, \partial_x + \beta_0 x^{-(\lambda_0+2)})$ .

**Lemma 4.2.** *Es gilt, dass  $P'$  Koeffizienten in  $\mathbb{C}[[x]]$  hat.*

*Beweis.* TODO

□

Des weiteren ist  $\sigma_L(P') = \sum_{k \geq 0} \alpha_k (\theta + \beta_0)^k$ . Wir unterscheiden nun 2 Unterfälle:

1. **Die Determinanten Gleichung  $\sigma_L(P)$  hat nur eine Nullstelle.**

Kommentar: TODO: Hier weiter

2. **Die Determinanten Gleichung  $\sigma_L(P)$  hat mehrere Nullstellen.**

Kommentar: TODO: Hier weiter

**Zweiter Fall:**  $\lambda_1 \neq 1$ . In diesem Fall ist einzige Slope  $\Lambda$  nicht ganzzahlig. Mache deshalb einen pull-back mit  $\lambda_1$ . Sei  $\rho : t \mapsto x := t^{\lambda_1}$  und erhalte  $P'$  so dass  $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P'$ . Nach Lemma 2.49 hat  $P'$  den einen Slope  $\Lambda \cdot \lambda_1 = \lambda_0$ . Damit können wir nun die zugehörige Linearform  $L' := \lambda_0 s_0 + s_1$  definieren. Es gilt dass

$$\sigma_{L'}(P') = \dots$$

ist, welches zumindest zwei unterschiedliche Nullstellen hat. Nun wendet man den zweiten Unterfall des ersten Fall an.

□

## 4.2 Sabbah's Refined version

**Proposition 4.3.** [Sab07, Prop 3.1] Jeder irreduzible endlich dimensionale formale Meromorphe Zusammenhang  $\mathcal{M}_{\widehat{L}}$  ist isomorph zu  $\rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes_{\widehat{K}} S)$ , wobei  $\varphi \in x^{-1}\mathbb{C}[x^{-1}]$ ,  $\rho : x \mapsto t = x^p$  mit  $\text{grad } p \geq 1$  minimal bzgl.  $\varphi$  (siehe [Sab07, Rem 2.8]), und  $S$  ist ein Rang 1  $\widehat{K}$ -Vektor Raum mit regulärem Zusammenhang.

Beweis. [Sab07, Prop 3.1]

□

**Satz 4.4** (Refined Turrittin-Levelt). [Sab07, Cor 3.3] Jeder endlich dimensionale Meromorphe Zusammenhang  $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$  kann in eindeutiger weiße geschrieben werden als direkte Summe  $\bigoplus \text{El}(\rho, \varphi, R) \stackrel{\text{def}}{=} \bigoplus \rho_+(\mathcal{E}^\varphi) \otimes R$ , so dass jedes  $\rho_+\mathcal{E}^\varphi$  irreduzibel ist und keine zwei  $\rho_+\mathcal{E}^\varphi$  isomorph sind.

Kommentar: In welchem Raum ist  $\mathcal{M}$  ?? in  $L$  oder in  $K$

Beweis. [Sab07, Cor 3.3]

□

## 5 DIE Klasse der Fourier-Transformationen

In diesem Kapitel werden Beispiele einer speziellen Klasse von  $\mathcal{D}$ -Moduln diskutiert. Dazu wird im folgendem zu einem Beispiel unter anderem explizit der Beweis aus [Sab90] zur Levelt-Turrittin-Zerlegung nachvollzogen.

Es wird zunächst ein allgemeines Rezept gegeben, welches zu gegebenem  $\varphi$  D-Moduln ergibt. Im Laufe des Kapitels werden immer speziellere  $\varphi$  betrachtet und zuletzt wird für konkrete Beispiele eine explizite Rechnung gegeben.

### 5.1 Rezept für allgemeine $\varphi$

Hier wollen wir nun eine Spezielle Klasse von Meromorphen Zusammenhängen, die die durch das folgende Rezept entstehen.

1. Wähle zunächst ein  $\varphi \in \{\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k} \mid I \subset \mathbb{N} \text{ endlich, } a_k \in \mathbb{C}\}$  aus
2. und beginne mit  $\mathcal{E}^\varphi$ . Es gilt

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}^\varphi &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \left( \partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \\
 &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{\left( \text{Hauptnenner von } \frac{d}{dt} \varphi(t) \right)}_{\in \mathbb{C}[t] \subset \mathcal{D}_{\widehat{L}}^*} \cdot \left( \partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \\
 &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{\left( t^{\max(I)+1} \cdot \left( \partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \right)}_{=: Q(t, \partial_t)}
 \end{aligned}$$

**Kommentar:** Dies ändert den Meromorphen Zusammenhang nicht, weil  $t^{\max(I)+1}$  eine Einheit in  $\mathcal{D}_{\widehat{L}}$  (und auch in  $\mathcal{D}_L$ ) ist.

3. Fouriertransformiere  $\mathcal{E}^\varphi$  und erhalte

$$\mathcal{F} \mathcal{E}^\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \mathcal{F}_Q(z, \partial_z)$$



$$\stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{Q(\partial_z, -z)}_{\in \mathbb{C}[z] \langle \partial_z \rangle}$$

4. Betrachte den Zusammenhang bei Unendlich, also wende den Übergang  $x \rightsquigarrow z^{-1}$  an.

Was passiert mit der Ableitung  $\partial_x$ ? Es gilt

$$\partial_x(f(\frac{1}{x})) = \partial_z(f) \cdot (-\frac{1}{x^2}) = -\partial_z(f) \cdot z^2 = -z^2 \cdot \partial_z(f)$$

also  $\partial_x \rightsquigarrow -z^2 \partial_z$ .

$$P_\varphi(x, \partial_x) := \mathcal{F}_Q(x^{-1}, -x^2 \partial_x) \in \mathbb{C}[t] \langle \partial_t \rangle$$

Im folgendem werden wir den zum Minimalpolynom  $P_\varphi$  assoziierten formalen Meromorphen Zusammenhang  $\mathcal{M}_\varphi := \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi$  betrachten.

**Lemma 5.1.** *Zu einem  $\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k} \in \varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k} | I \subset \mathbb{N} \text{ endlich, } a_k \in \mathbb{C} \}$  ist das Minimalpolynom von  $\mathcal{M}_\varphi$  explizit gegeben durch*

$$P_\varphi(x, \partial_x) = (-x^2 \partial_x)^{\max(I)} (x \partial_x - 1) + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \in \mathbb{C}[x] \langle \partial_x \rangle$$

*Beweis.* Sei  $\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k}$ , so ist

$$\begin{aligned} Q(t, \partial_t) &= t^{\max(I)+1} \underbrace{(\partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t))}_{\in \mathbb{C}[t][t^{-1}] \langle \partial_t \rangle} \\ &= t^{\max(I)+1} \underbrace{\left( \partial_t + \sum_{k \in I} k \frac{a_k}{t^{k+1}} \right)}_{\in \mathbb{C}[t][t^{-1}] \langle \partial_t \rangle} \\ &= t^{\max(I)+1} \partial_t + \sum_{k \in I} k \underbrace{\frac{a_k}{t^{k-\max(I)}}}_{\in \mathbb{C}[t] \langle \partial_t \rangle} \\ &= t^{\max(I)+1} \partial_t + \sum_{k \in I} k a_k t^{\max(I)-k} \in \mathbb{C}[t] \langle \partial_t \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_Q(z, \partial_z) &= Q(\partial_z, -z) \\ &= -\partial_z^{\max(I)+1} z + \sum_{k \in I} k a_k \partial_z^{\max(I)-k} \end{aligned}$$

und damit ist

$$\begin{aligned} P_\varphi(x, \partial_x) &= \mathcal{F}_Q(x^{-1}, -x^2 \partial_x) \\ &= \underbrace{-(-x^2 \partial_x)^{\max(I)+1} x^{-1}}_{\in \mathbb{C}[x] \langle \partial_x \rangle} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \overbrace{(-x^2 \partial_x)^{\max(I)} x^2 \partial_x x^{-1}} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \\
 &= (-x^2 \partial_x)^{\max(I)} \overbrace{x^2 (x^{-1} \partial_x - x^{-2})} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \\
 &= (-x^2 \partial_x)^{\max(I)} \overbrace{(x \partial_x - 1)} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \quad \in \mathbb{C}[x] < \partial_x >
 \end{aligned}$$

□

Im Anhang B wird das  $(x^2 \partial_x)^k$  genauer diskutiert. Dies führt aber hier an dieser Stelle nicht mehr weiter in die gewünschte Richtung.

**Lemma 5.2.** *Es gilt  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_\varphi) = \{\frac{q}{q+1}\}$ .*

**Kommentar:** Allgemeiner? für allgemeine  $\varphi$ ??

*Beweis.* [Sab07, 5.b.] Um zu zeigen, dass die Behauptung gilt, formen wir  $P_\varphi$  um und isolieren die Monome, die für das Newton-Polygon nicht von Bedeutung sind und vernachlässigt werden können. Betrachte dazu die Konvexen Hüllen, die wie in Abschnitt 2.3 konstruiert werden. Sei  $q := \max(I)$ .

$$\begin{aligned}
 H(P_\varphi(x, \partial_x)) &= H\left(\underbrace{(-x^2 \partial_x)^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}} (x \partial_x - 1) + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(\overbrace{(-1)^q (x^{2q} \partial_x^q + \text{T.i.Q. von } x^{2q} \partial_x^q)}^{\text{liefert keinen Beitrag}} (x \partial_x - 1) + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(\underbrace{(-1)^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}} \underbrace{x^{2q} \partial_x^q (x \partial_x - 1)}_{\text{liefert keinen Beitrag}} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(\overbrace{x^{2q} \partial_x^q x \partial_x - x^{2q} \partial_x^q} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(\overbrace{x^{2q} (x \partial_x^q + q \partial_x^{q-1}) \partial_x - x^{2q} \partial_x^q} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(x^{2q+1} \partial_x^{q+1} + \underbrace{q x^{2q} \partial_x^q - x^{2q} \partial_x^q}_{\text{im Quadranten von } x^{2q+1} \partial_x^{q+1}, \text{ sind also vernachlässigbar}} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}\right) \\
 &= H\left(x^{2q+1} \partial_x^{q+1} + q a_q + \overbrace{\sum_{k \in I \setminus \{q\}} k a_k (-x^2 \partial_x)^{q-k}}\right)
 \end{aligned}$$

Nun wollen wir noch zeigen, dass die Summe auch vernachlässigt werden kann.

**Behauptung:** Es gilt

$$H\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q + \sum_{k \in I \setminus \{q\}} ka_k(-x^2\partial_x)^{q-k}\right) \subset H\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q\right)$$

**Denn:** Betrachte zu einem  $m \in I \setminus \{q\}$ , einen Summanden  $ma_m(-x^2\partial_x)^{q-m}$  aus der Summe:

$$\begin{aligned} H(ma_m(-x^2\partial_x)^{q-m}) &= H(ma_m(-1)^q(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m} + \mathbf{T.i.Q. von } x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m})) \\ &= H(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m}) \\ &= (q-m, q-m) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \end{aligned}$$

In Abbildung 5.1 ist die Situation, die wir gerade betrachten dargestellt, mit  $N(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q)$  in der gewohnten Farbe und in Blau ist  $H(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m})$  eingezeichnet. Man sieht also, dass die Behauptung gilt. Beh.  $\square$

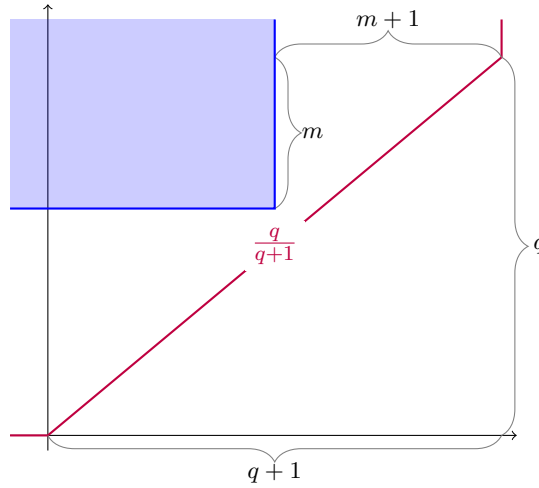


Abbildung 5.1: Newton-Polygon zu  $P_\varphi$

Mit der Behauptung gilt dann, dass

$$\begin{aligned} H\left(P_\varphi(x, \partial_x)\right) &= H\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q + \sum_{k \in I \setminus \{q\}} ka_k(-x^2\partial_x)^{q-k}\right) \\ &\stackrel{\text{Beh.}}{=} H\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q\right) \end{aligned}$$

Also ist

$$N\left(P_\varphi(x, \partial_x)\right) = N\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q\right).$$

womit die Behauptung folgt und das Newton-Polygon wie in Abbildung 5.1 aussieht.  $\square$

Kommentar:

**Korollar 5.3.** *Ordnung vom pull-back ist 0*

Also ist, nach Lemma 2.49, ein pull-back mit Grad  $q + 1$  hinreichend, um einen ganzzahligen Slope zu bekommen. Wir wissen, dass nach Anwenden eines solchen pull-backs die Slopes mit  $q + 1$  multipliziert werden, also gilt  $\mathcal{P}(\rho^+ \mathcal{M}_\varphi) = \{q\} \subset \mathbb{N}$ .

**Lemma 5.4.** *Im Fall  $\varphi = \frac{a}{t^q}$  ist mit  $\rho : t \mapsto x := -(q + 1)t^{q+1}$  der pull-back gegeben durch*

$$\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((t^{q+2} \partial_t)^q (t \partial_t - (q + 1)) + (q + 1)qa).$$

*Beweis.* Sei  $\varphi = \frac{a}{t^q}$ , so ist  $P$  gegeben durch

$$P_\varphi(x, \partial_x) = (-x^2 \partial_x)^q (x \partial_x - 1) + qa,$$

Sei  $\rho : t \mapsto x := -(q + 1)t^{q+1}$  so ist

$$\begin{aligned} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi &= \rho^+ (\mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(-(q + 1)t^{q+1}, -\frac{1}{(q + 1)^2 t^q} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot \underbrace{\left( \left( -(-(q + 1)t^{q+1})^2 \frac{-1}{(q + 1)^2 t^q} \partial_t \right)^q \right)}_{=1} \underbrace{\left( -(q + 1)t^{q+1} \frac{-1}{(q + 1)^2 t^q} \partial_t - 1 \right)}_{=1} + qa \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot \left( \underbrace{\left( -\frac{(q + 1)^2}{(q + 1)^2} \right)}_{=1} \underbrace{t^{2(q+1)-q} \partial_t^q}_{=1} \left( \frac{1}{q + 1} t \partial_t - 1 \right) + qa \right) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot \left( (t^{q+2} \partial_t)^q \left( \frac{1}{q + 1} t \partial_t - 1 \right) + qa \right) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((t^{q+2} \partial_t)^q (t \partial_t - (q + 1)) + (q + 1)qa) \end{aligned}$$

□

Definiere mittels  $q = \frac{q}{1} =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$  die Linearform

$$\ell(s_0, s_1) = \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1 = q s_0 + s_1.$$

Schreibe  $\rho^* P_\varphi = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} t^j \partial_t^i$  und berechne die *Determinanten Gleichung*  $\sigma_\ell(\rho^* P_\varphi) \in \widehat{L}[\xi]$ .

Kommentar: Schon gezeigt, dass  $\text{ord}_\ell = 0$ ?

$$\begin{aligned}\sigma_L(\rho^* P_\varphi) &= \sum_{\{(i,j) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Z} \mid \ell(i,i-j)=0\}} \alpha_{ij} t^j \xi^i \\ &= \sum_{\{(i,j) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Z} \mid (q+1)i-j=0\}} \alpha_{ij} t^j \xi^i\end{aligned}$$

Da  $\widehat{L}[\xi]$  kommutativ ist gilt hier, dass  $(t^j \xi^i)^k = t^{jk} \xi^{ik}$  ist. Setze  $\theta = t^{\lambda_0 + \lambda_1} \xi^{\lambda_1} = t^{q+1} \xi$  so können wir

$$\sigma_L(\rho^* P_\varphi) = \sum_{k \geq 0} \alpha_k \theta^k \quad \alpha_k \in \mathbb{C}$$

schreiben, welches wir als nächsten Schritt faktorisieren

$$\sigma_L(\rho^* P_\varphi) = \varepsilon \prod_{\beta \text{ Nullstelle}} (\theta - \beta)^{\gamma_\beta}.$$

Wobei  $\varepsilon \in \mathbb{C}^\times$  eine Konstante ist. Sei  $\beta$  eine der Nullstellen. Da  $\text{ord}_\ell(\rho^* P_\varphi) = 0$  und der einzige Slope von  $\rho^* P_\varphi$  nicht gleich 0 ist, gilt offensichtlich, dass  $\alpha_0 \neq 0$ . Also ist 0 keine Nullstelle von  $\sigma_L(\rho^* P_\varphi)$ . Setze  $\psi(x) := (\beta/\lambda_0)t^{-\lambda_0} = (\beta/q)t^{-q}$  und betrachte

$$\mathcal{N} := \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^\psi = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\rho^* P_\varphi) \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^\psi.$$

**Lemma 5.5.** Sei  $\mathbf{e}$  ein zyklischer Vektor zu  $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi$ , so ist  $\mathbf{e} \otimes \underbrace{1}_{\in \widehat{L}} \in \mathcal{N}$  ein zyklischer Vektor für  $\mathcal{N} \stackrel{\text{def}}{=} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^\psi$ .

*Beweis.* Es sei  $\mathbf{e}$  ein zyklischer Vektor von  $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi$ . Da der Grad von  $\rho^* P_\varphi$  gleich  $q+1$  ist, ist auch die Dimension von  $\rho^+ \mathcal{M}$  gleich  $q+1$ . Damit ist auch  $\dim_K \mathcal{N} = q+1$ , also reicht zu zeigen, dass  $\mathbf{e} \otimes 1, \partial_t(\mathbf{e} \otimes 1), \partial_t^2(\mathbf{e} \otimes 1), \dots, \partial_t^q(\mathbf{e} \otimes 1)$  ein linear unabhängiges System ist. Es gilt

$$\begin{aligned}\partial_t(\mathbf{e} \otimes 1) &= (\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + t \otimes \partial_t 1 \\ &= (\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \mathbf{e} \otimes \psi'(t) \\ &= (\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \psi'(t)(\mathbf{e} \otimes 1) \\ \partial_t^2(\mathbf{e} \otimes 1) &= \partial_t((\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \psi'(t)(\mathbf{e} \otimes 1)) \\ &= (\partial_t^2 \mathbf{e}) \otimes 1 + (\partial_t \mathbf{e}) \otimes \psi'(t) + \psi''(t)(\mathbf{e} \otimes 1) + \psi'(t)((\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \mathbf{e} \otimes \psi'(t)) \\ &= (\partial_t^2 \mathbf{e}) \otimes 1 + \psi'(t)(\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \psi''(t)(\mathbf{e} \otimes 1) + \psi'(t)(\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \psi'(t)^2(\mathbf{e} \otimes 1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (\partial_t^2 \mathbf{e}) \otimes 1 + 2\psi'(t)(\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + (\psi''(t) + \psi'(t)^2)(\mathbf{e} \otimes 1) \\
 &\vdots \\
 \partial_t^q(\mathbf{e} \otimes 1) &= (\partial_t^q \mathbf{e}) \otimes 1 + \lambda_{q-1}(\partial_t^{q-1} \mathbf{e}) \otimes 1 + \cdots + \lambda_1(\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 + \lambda_0(\mathbf{e} \otimes 1)
 \end{aligned}$$

und somit ist dann

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e} \otimes 1 \\ \partial_t(\mathbf{e} \otimes 1) \\ \partial_t^2(\mathbf{e} \otimes 1) \\ \vdots \\ \partial_t^{q-1}(\mathbf{e} \otimes 1) \\ \partial_t^q(\mathbf{e} \otimes 1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \psi'(t) & 1 & 0 & & & \vdots \\ \star & \star & 1 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \star & \cdots & \cdots & \star & 1 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \cdots & \cdots & \lambda_{q-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e} \otimes 1 \\ (\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1 \\ (\partial_t^2 \mathbf{e}) \otimes 1 \\ \vdots \\ (\partial_t^{q-1} \mathbf{e}) \otimes 1 \\ (\partial_t^q \mathbf{e}) \otimes 1 \end{pmatrix}$$

Da bekanntlich  $\mathbf{e} \otimes 1, (\partial_t \mathbf{e}) \otimes 1, (\partial_t^2 \mathbf{e}) \otimes 1, \dots, (\partial_t^q \mathbf{e}) \otimes 1$  linear unabhängig sind, gilt dies auch für  $\mathbf{e} \otimes 1, \partial_t(\mathbf{e} \otimes 1), \partial_t^2(\mathbf{e} \otimes 1), \dots, \partial_t^q(\mathbf{e} \otimes 1)$ . Damit folgt die Behauptung.  $\square$

Kommentar:

**Lemma 5.6.** [Hei10, Seite 44] Wenn  $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\rho^* P_\varphi(t, \partial_t))$  gilt, so ist

$$\begin{aligned}
 \mathcal{N} &\stackrel{\text{def}}{=} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^\psi = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\rho^* P_\varphi(t, \partial_t + \frac{\beta}{t^{\lambda+1}})) \\
 &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (t^{q+2}(\partial_t + \frac{\beta}{t^{\lambda+1}})^q (t(\partial_x + \frac{\beta}{t^{\lambda+1}}) - (q+1)) + (q+1)qa)
 \end{aligned}$$

Zerlege nun wie in Satz 2.32 den Meromorphen Zusammenhang  $\mathcal{N}$  in  $\mathcal{N} = \bigoplus_i \mathcal{N}_i$  wobei  $\mathcal{N}_i$  Meromorphe Zusammenhänge mit genau einem Slope sind. Twiste die  $\mathcal{N}_i$  jeweils mit  $\mathcal{E}_{\widehat{L}}^{-\psi}$  und somit ist dann

$$\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \bigoplus_i \mathcal{N}_i \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^{-\psi}.$$

Für jeden Summanden lässt sich nun Induktion anwenden.

## 5.2 Levelt-Turrittin-Zerlegung für $\mathcal{M}_\varphi$ mit $\varphi_1 := \frac{a}{x}$

Als konkreten Fall betrachten wir nun  $\mathcal{M}_\varphi$  bezüglich  $\varphi_1 := \frac{a}{x}$ . Es ist das zugehörigen Minimalpolynom gegeben durch

$$P_\varphi(x, \partial_x) = -x^2 \partial_x (x \partial_x - 1) + a$$

$$\begin{aligned}
 &= -x^2 \overbrace{\partial_x x \partial_x} + x^2 \partial_x + a \\
 &= -x^2 \overbrace{(x \partial_x + 1) \partial_x} + x^2 \partial_x + a \\
 &= \overbrace{-x^3 \partial_x^2 - x^2 \partial_x} + x^2 \partial_x + a \\
 &= -x^3 \partial_x^2 + a
 \end{aligned}$$

Erhalte daraus das Newton-Polygon mit den Slopes  $\mathcal{P}(\mathcal{M}_\varphi) = \{\frac{1}{2}\}$ .

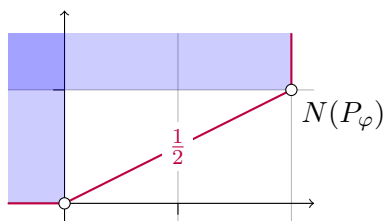


Abbildung 5.2: Newton Polygon zu  $P_\varphi$

Berechne nun zu  $\rho : t \mapsto x := -2t^2$  ein Minimalpolynom  $\rho^* P_\varphi$  zu  $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi$ :

$$\begin{aligned}
 \rho^* P_\varphi(x, \partial_x) &= t^3 \partial_t (t \partial_t - 2) + 2a \\
 &= t^3 \overbrace{\partial_t t \partial_t} - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^3 \overbrace{(t \partial_t + 1) \partial_t} - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 + t^3 \partial_t - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 - t^3 \partial_t + 2a
 \end{aligned}$$

und erhalte einen Meromorphen Zusammenhang  $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot \rho^* P_\varphi$  mit genau dem Slope  $1 = \frac{1}{1} =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ .

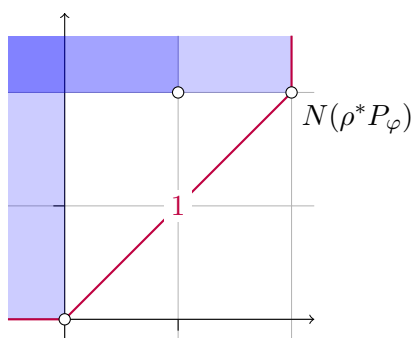


Abbildung 5.3: Newton Polygon zu  $\rho^* P_\varphi$

Definiere die Linearform  $\ell(s_0, s_1) := \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1 = s_0 + s_1$ . Berechne nun die *Determinanten Gleichung*  $\sigma_\ell(\rho^* P_\varphi) \in \widehat{L}[\xi]$  von  $\rho^* P_\varphi$ .

$$\begin{aligned}\sigma_\ell(\rho^* P_\varphi) &= \sum_{\{(i,j)|2i-j=0\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i \\ &= t^4 \xi^2 + 2a\end{aligned}$$

Setze  $\theta := t^{\lambda_0 + \lambda_1} \xi^{\lambda_1} = t^2 \xi$  so erhalten wir

$$\sigma_\ell(\rho^* P_\varphi) = \theta^2 + 2a$$

schreiben, welches wir als nächstes faktorisieren

$$\begin{aligned}\sigma_L(\rho^* P_\varphi) &= \theta^2 + 2a \\ &= (\theta - \underbrace{i\sqrt{2a}}_{=: \beta})(\theta + i\sqrt{2a})\end{aligned}$$

Setze  $\psi(x) := (\beta/\lambda_0)t^{-\lambda_0} = i\sqrt{2a}t^{-1}$  und betrachte den Twist  $\mathcal{N} := \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes \mathcal{E}^\psi$  von  $\rho^+ \mathcal{M}$ . Es ist  $e \otimes 1$  ein zyklischer Vektor, wobei  $e$  ein zyklischer Vektor von  $\rho^+ \mathcal{M}$  ist. Es ist

$$\begin{aligned}\partial_t^2(e \otimes 1) &= \partial_t(\underbrace{\partial_t(e \otimes 1)}) \\ &= \partial_t(\underbrace{(\partial_t e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(t)}) \\ &= \underbrace{(\partial_t^2 e) \otimes 1} + \underbrace{(\partial_t e) \otimes \psi'(t) + (\partial_t e) \otimes \psi'(t)} + \underbrace{e \otimes ((\frac{\partial}{\partial t} + \psi'(t))\psi'(t))}_{\in K} \\ &= \underbrace{((t^{-1}\partial_t - 2at^{-4})e) \otimes 1} + \underbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1} + \underbrace{(\psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\ &= \underbrace{(t^{-1}\partial_t e) \otimes 1 - 2at^{-4}e \otimes 1} + \underbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1} + \underbrace{(\psi''(t)e \otimes 1 + \psi'(t)^2 e \otimes 1)} \\ &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t e) \otimes 1} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\ &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t(e \otimes 1) - e \otimes \psi'(t))} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\ &= (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t(e \otimes 1) - (\psi'(t)t^{-1} + 2\psi'(t)^2)e \otimes 1 \\ &\quad + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\ &= ((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2\psi'(t)^2 - 2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\ &= ((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2at^{-4} + \psi''(t) - \psi'(t)^2)e \otimes 1\end{aligned}$$

also

$$0 = \underbrace{(\partial_t^2 - (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t + \psi'(t)t^{-1} + 2at^{-4} - \psi''(t) + \psi'(t)^2)}_{=: P'} e \otimes 1$$



und somit mit  $\psi(t) = i\sqrt{2a}t^{-1}$  ist  $\psi'(t) = -i\sqrt{2a}t^{-2}$  und  $\psi''(t) = 2i\sqrt{2a}t^{-3}$ . Also durch Einsetzen ergibt sich

$$\begin{aligned}
 P' &= \partial_t^2 - (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t + \psi'(t)t^{-1} + 2a - \psi''(t) + \psi'(t)^2 \\
 &= \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2a}t^{-2})\partial_t - i\sqrt{2a}t^{-3} + 2a^{-4} - 2i\sqrt{2a}t^{-3} + \underbrace{(-i\sqrt{2a}t^{-2})^2}_{=0} \\
 &= \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2a}t^{-2})\partial_t - 3i\sqrt{2a}t^{-3} + \underbrace{2at^{-4} - 2at^{-4}}_{=0} \\
 &= \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2a}t^{-2})\partial_t - 3i\sqrt{2a}t^{-3}
 \end{aligned}$$

mit, wie gewünscht, mehr als einem Slope.

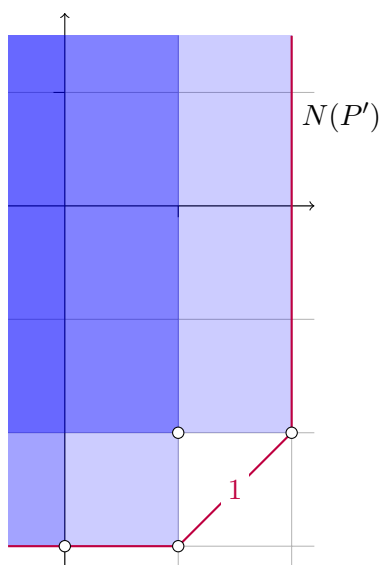


Abbildung 5.4: Newton Polygon zu  $\mathcal{N}$

**Kommentar:** Alternative berechnung: mit Formel aus [Hei10, Seite 44]

$$P'(t, \partial_t) = \rho^* P(t, \partial_t - \frac{\partial \psi}{\partial t})$$

es ist  $\rho^* P(t, \partial_t) = t^4 \partial_t^2 - t^3 \partial_t + 2a$ , und somit

$$\begin{aligned}
 P'(t, \partial_t) &= \rho^* P(t, \partial_t - \frac{\partial \psi}{\partial t}) \\
 &= \rho^* P(t, \partial_t - \frac{-i\sqrt{2a}}{t^2}) \\
 &= t^4 (\partial_t + \frac{i\sqrt{2a}}{t^2})^2 - t^3 (\partial_t + \frac{i\sqrt{2a}}{t^2}) + 2a
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= t^4 \overbrace{(\partial_t + i\sqrt{2at^{-2}})(\partial_t + i\sqrt{2at^{-2}})} - t^3 \partial_t - i\sqrt{2at} + 2a \\
 &= t^4 \overbrace{(\partial_t^2 + i\sqrt{2at^{-2}}\partial_t + \partial_t i\sqrt{2at^{-2}} + (i\sqrt{2at^{-2}})^2)} - t^3 \partial_t - i\sqrt{2at} + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 + i\sqrt{2at^2}\partial_t + i\sqrt{2at^4} \overbrace{\partial_t t^{-2} - 2at^{-4}t^4} - t^3 \partial_t - i\sqrt{2at} + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 + i\sqrt{2at^2}\partial_t + i\sqrt{2at^4} \overbrace{(t^{-2}\partial_t - 2t^{-3})} - t^3 \partial_t - i\sqrt{2at} \\
 &= t^4 \partial_t^2 + i\sqrt{2at^2}\partial_t + i\sqrt{2at^2}\partial_t - 2i\sqrt{2at} - t^3 \partial_t - i\sqrt{2at} \\
 &= t^4 \partial_t^2 - (t^3 - 2i\sqrt{2at^2})\partial_t - 3i\sqrt{2at}
 \end{aligned}$$

Unser nächstes Ziel ist es,  $\mathcal{N} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P'$  in zwei Meromorphe Zusammenhänge mit nur einem Slope zerlegen. Betrachte hierzu das Minimalpolynom und zerlege dieses in ein Produkt  $P'(t, \partial_t) = Q_1(t, \partial_t) \cdot Q_2(t, \partial_t)$ .

Da der  $\partial_t$ -Grad von  $P'$  genau 2 ist, müssen die  $Q_i$  jeweils den Grad 1 haben, um eine nichttriviale Zerlegung zu bekommen.

*Beobachtung 5.7.* Ist  $Q_1$  und  $Q_2$  so ein solches Paar, dann ist für  $\sigma \in \widehat{K}$  das Paar  $\bar{Q}_1 := Q_1 \cdot \sigma^{-1}$  und  $\bar{Q}_2 := \sigma \cdot Q_2$  ebenfalls eine Zerlegung, denn

$$P' = Q_1 \cdot Q_2 = \underbrace{Q_1 \cdot \sigma^{-1}}_{\in \mathcal{D}_{\widehat{L}}} \cdot \underbrace{\sigma \cdot Q_2}_{\in \mathcal{D}_{\widehat{L}}} = \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_2.$$

Mit der Beobachtung 5.7 ist klar, dass wir den Faktor vor den  $\partial_t$  in  $Q_2$  frei wählen können. Setze diesen also allgemein auf 1 und erhalte

$$Q_1 := \bar{v}(t)\partial_t + v(t) \quad Q_2 := \partial_t + u(t) \quad \text{mit } \bar{v}(t), v(t), u(t) \in \mathbb{C}[[t]]$$

und somit ist das Produkt gegeben durch

$$\begin{aligned}
 Q_1 \cdot Q_2 &= \bar{v}(t)\partial_t^2 + \bar{v}(t)\partial_t u(t) + v(t)\partial_t + v(t)u(t) \\
 &\stackrel{!}{=} \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2at^{-2}})\partial_t - 3i\sqrt{2at^{-3}}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Damit ist ebenfalls  $\bar{v}(t) = 1$ .

Durch das Wissen über die Slopes der  $Q_i$  erhalten wir noch Informationen über die Reihen  $v(t) := \sum_n v_n t^n$  bzw.  $u(t) := \sum_n u_n t^n$ . Die beiden Polynome  $Q_1$  und  $Q_2$  enthalten  $\partial_t$  als einziges Monom vom  $\partial_t$ -Grad 1, deshalb ist  $(1, -1)$  in beiden zugehörigen Newton-Polygonen enthalten. Da  $Q_1$  nur den Slope 0 hat, muss das Newton-Polygon wie in Abbildung 5.5 aussen und somit wissen wir, dass  $v_n = 0$  für alle  $n < -1$ . Da  $Q_2$  genau den Slope 1 hat, ist das

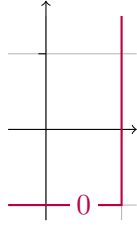


Abbildung 5.5: Newton-Polygon zu  $Q_1$

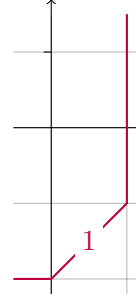


Abbildung 5.6: Newton-Polygon zu  $Q_2$

Newton-Polygon gegeben durch Abbildung 5.6. Damit ist  $u_n = 0$  für alle  $n < -2$  und  $u_{-2} \neq 0$ .

Mit diesen Informationen erhalten wir aus (5.1) die Gleichung

$$Q_1 \cdot Q_2 = \partial_t^2 + \partial_t \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n + \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \partial_t + \left( \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \right) \quad (5.2)$$

und mit den Kommutatorregeln gilt

$$\begin{aligned} \partial_t \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n &= \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n t^n \partial_t + [\partial_t, u_n t^n]) \\ &= \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n t^n \partial_t + n u_n t^{n-1}) \\ &= \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \partial_t + \sum_{n=-2}^{\infty} n u_n t^{n-1} \end{aligned}$$

Wenn wir dieses Ergebnis nun in (5.2) einsetzen ergibt sich

$$\begin{aligned} Q_1 \cdot Q_2 &= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \partial_t + \sum_{n=-2}^{\infty} n u_n t^{n-1} + \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \partial_t + \left( \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \right) \\ &= \partial_t^2 + \underbrace{\left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n + \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right)}_{\sum_{n=-2}^{\infty} (u_n + v_n) t^n} \partial_t + \underbrace{\sum_{n=-2}^{\infty} n u_n t^{n-1}}_{\sum_{n=-3}^{\infty} (n+1) u_{n+1} t^n} + \left( \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \right) \quad (5.3) \\ &= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n + v_n) t^n \partial_t + \sum_{n=-3}^{\infty} (n+1) u_{n+1} t^n + \left( \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \right) \end{aligned}$$

Betrachte nun das Letzte Glied, auf welches wir die Cauchy-Produktformel anwenden wollen:

$$\left( \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \left( \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \right) = t^{-3} \left( \sum_{n=0}^{\infty} v_{n-1} t^n \right) \left( \sum_{n=0}^{\infty} u_{n-2} t^n \right)$$

$$\begin{aligned}
 &= t^{-3} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^n v_{k-1} t^k u_{n-k-2} t^{(n-k)} \right) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^n v_{k-1} u_{n-k-2} t^{k+(n-k)-3} \right) \\
 &= \sum_{n=0}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^n v_{k-1} u_{n-k-2} \right) t^{n-3} \\
 &= \sum_{n=-3}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1} u_{n-k+1} \right) t^n
 \end{aligned}$$

Wenn wir auch diese Rechnung in (5.3) integrieren, erhalten wir

$$\begin{aligned}
 Q_1 \cdot Q_2 &= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n + v_n) t^n \partial_t + \underbrace{\sum_{n=-3}^{\infty} (n+1) u_{n+1} t^n + \sum_{n=-3}^{\infty} \left( \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1} u_{n-k+1} \right) t^n}_{\text{}} \\
 &= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n + v_n) t^n \partial_t + \sum_{n=-3}^{\infty} \left( (n+1) u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1} u_{n-k+1} \right) t^n \\
 &\stackrel{!}{=} \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2a}t^{-2}) \partial_t - 3i\sqrt{2a}t^{-3}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Nun haben wir ein Ergebnis, das sich Koeffizientenweise mit der gewünschten Formel vergleichen lässt:

$$2i\sqrt{2a}t^{-2} - t^{-1} = \sum_{n=-2}^{\infty} (u_n + v_n) t^n \tag{5.5}$$

$$-3i\sqrt{2a}t^{-3} = \sum_{n=-3}^{\infty} \left( (n+1) u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1} u_{n-k+1} \right) t^n \tag{5.6}$$

Nun können wir mit (5.5) und (5.6) jeweils nochmals einen Koeffizientenvergleich machen und erhalten zunächst aus (5.5), dass

$$2i\sqrt{2a} = u_{-2} + \underbrace{v_{-2}}_{=0} = u_{-2} \tag{5.7}$$

$$-1 = u_{-1} + v_{-1} \tag{5.8}$$

$$0 = u_n + v_n \quad \forall n \geq 0 \tag{5.9}$$

Als nächstes wollen wir dieses Ergebnis mit (5.6) kombinieren. Betrachte zunächst den Vorfaktor vor  $t^{-3}$ :

$$\begin{aligned}
 -3i\sqrt{2a} &= (-2)u_{-2} + \sum_{k=0}^0 v_{k-1} u_{-3-k+1} \\
 &= -2u_{-2} + v_{-1} u_{-2} \\
 &\stackrel{(5.7)}{=} -2 \cdot 2i\sqrt{2a} + v_{-1} 2i\sqrt{2a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \stackrel{a \neq 0}{\Rightarrow} v_{-1} &= \frac{4i\sqrt{2a} - 3i\sqrt{2a}}{2i\sqrt{2a}} \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

und somit

$$\begin{aligned} \stackrel{(5.8)}{\Rightarrow} -1 &= u_{-1} + v_{-1} \\ &= u_{-1} + \frac{1}{2} \\ \Rightarrow u_{-1} &= -\frac{3}{2} \end{aligned}$$

Nun zum allgemeinem Koeffizienten vor  $t^n$  mit  $n > -3$ :

$$\begin{aligned} 0 &= (n+1)u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1}u_{n-k+1} \\ &= (n+1)u_{n+1} + \left( \sum_{k=0}^{n+2} v_{k-1}u_{n-k+1} \right) + v_{n+3-1} \underbrace{u_{n-(n+3)+1}} \\ &= (n+1)u_{n+1} + \left( \sum_{k=0}^{n+2} v_{k-1}u_{n-k+1} \right) + v_{n+2} \overbrace{u_{-2}} \\ \Rightarrow v_{n+2}u_{-2} &= - \left( (n+1)u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+2} v_{k-1}u_{n-k+1} \right) \\ \Rightarrow v_{n+2} &= -\frac{1}{u_{-2}} \left( (n+1)u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+2} v_{k-1}u_{n-k+1} \right) \end{aligned}$$

und nach passendem Indexshift  $n+2 \rightarrow n$  folgt

Kommentar: TODO: mapsto pfeil?

$$\begin{aligned} \Rightarrow v_n &= -\frac{1}{u_{-2}} \left( (n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^n v_{k-1}u_{n-k-1} \right) \\ &\stackrel{(5.7)}{=} -\frac{1}{2i\sqrt{2a}} \left( (n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^n v_{k-1}u_{n-k-1} \right) \\ &= \frac{i}{2\sqrt{2a}} \left( (n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^n v_{k-1}u_{n-k-1} \right) \end{aligned}$$

Zusammen mit  $u_{-2} = 2i\sqrt{2a}$ ,  $u_{-1} = -\frac{3}{2}$  und  $v_{-1} = \frac{1}{2}$  sind durch

$$v_n = -u_n = \frac{i}{2\sqrt{2a}} \left( (n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^n v_{k-1}u_{n-k-1} \right) \quad \forall n \geq 0 \quad (5.10)$$

die Koeffizienten von  $v$  und  $u$  vollständig bestimmt.

Nun lässt sich diese Zerlegung mit  $\mathcal{E}^{-\psi(t)}$  zurücktwisten und erhalte damit die Zerlegung

$$\begin{aligned}\rho^+ \mathcal{M}_\varphi &= \mathcal{N}_1 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)} \oplus \mathcal{N}_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)} \\ &= (\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_1 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)}) \oplus (\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)})\end{aligned}$$

und, da  $Q_1$  regulär, ist  $\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_1 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)}$  bereits ein Elementarer Meromorpher Zusammenhang. Betrachte also noch  $\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)}$ :

$$\begin{aligned}\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)} &= \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2(t, \partial_t - i\sqrt{2at^{-2}}) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{(\partial_t - i\sqrt{2at^{-2}} + u(t))}_{\text{regulär}} \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\partial_t + i\sqrt{2at^{-2}} + \sum_{n=-1}^{\infty} u_n t^n) \\ &= \underbrace{\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\partial_t + \sum_{n=-1}^{\infty} u_n t^n)}_{\text{regulär}} \otimes \mathcal{E}^{\psi(t)}\end{aligned}$$

Damit ist der Zweite Summand also auch ein Elementarer Meromorpher Zusammenhang. Also zerlegt sich  $\mathcal{M}$ , nach einem pull-back mit  $\rho : t \mapsto x = -2t^2$ , in

$$\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \left( \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \left( \partial_t + \sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n \right) \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)} \right) \oplus \left( \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \left( \partial_t + \sum_{n=-1}^{\infty} u_n t^n \right) \otimes \mathcal{E}^{\psi(t)} \right).$$

Damit ist die Levelt-Turrittin-Zerlegung vollständig gegeben.

### 5.2.1 Konvergenz der Summanden

Nun wollen wir noch prüfen, ob bei dieser Berechnung die Formalen Potenzreihen notwendig waren.

Kommentar: TODO: text

Es ist klar, dass

$$Q_1 \in \mathcal{D}_{\widehat{L}} \setminus \mathcal{D}_L \Leftrightarrow v(t) \in \widehat{L} \setminus L \quad \text{bzw.} \quad (\partial_t + \sum_{n=-1}^{\infty} u_n t^n) \in \mathcal{D}_{\widehat{L}} \setminus \mathcal{D}_L \Leftrightarrow u(t) \in \widehat{L} \setminus L$$

Deshalb wollen wir die Potenzreihen  $v$  und  $u$  noch genauer betrachten, im besonderen deren konvergenzverhalten. Als Konvergenzkriterium betrachten wir den folgenden Satz

**Satz 5.8** (Wurzkriterium nach Cauchy). Sei  $\sum_n a_n x^n$  eine Potenzreihe. Es gilt:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = +\infty \Rightarrow \text{die Potenzreihe ist nirgends Konvergent.}$$

*Beweis.* siehe [Kno64, §18, Satz 94]. □

**Satz 5.9** (Quotientenkriterium). Sei  $\sum_n a_n x^n$  eine Potenzreihe. Es gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|a_{n+1}|}{|a_n|} = 0 \Rightarrow \text{die Potenzreihe ist nirgends Konvergent.}$$

*Beweis.* TODO □

Aus (5.10) ergeben sich für  $n = 0$  die Koeffizienten

$$\begin{aligned} v_0 &= -\frac{1}{u_{-2}}((-1)u_{-1} + \sum_{k=0}^0 v_{k-1}u_{-k-1}) \\ &= -\frac{1}{u_{-2}}\left(\frac{3}{2} - \frac{3}{4}\right) \\ &= -\frac{3}{4u_{-2}} \\ &\stackrel{(5.7)}{=} \frac{3i}{8\sqrt{2a}} = -u_0 \end{aligned}$$

**Kommentar:** Somit ergeben sich für  $n = 1$  die Koeffizienten

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{1}{u_{-2}}((1-1)u_{1-1} + \sum_{k=0}^1 v_{k-1}u_{1-k-1}) \\ &= -\frac{1}{u_{-2}}(v_{-1}u_0 + v_0u_{-1}) \\ &= -\frac{v_0}{u_{-2}}(-v_{-1} + u_{-1}) \\ &= \frac{3}{u_{-2} \cdot 4u_{-2}}\left(-\frac{1}{2} - \frac{3}{2}\right) \\ &= \frac{3}{4u_{-2}^2}(-2) \\ &= -\frac{3}{2u_{-2}^2} \\ &= \frac{3}{16a} = -u_1 \end{aligned} \quad \begin{array}{l} a=\frac{1}{8} \\ = 1.5 \end{array}$$

und für  $n = 2$  ist

$$v_2 = -\frac{1}{u_{-2}}((2-1)u_{2-1} + \sum_{k=0}^2 v_{k-1}u_{2-k-1})$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{u_{-2}}(u_1 + v_{-1}u_1 + v_0u_0 + v_1u_{-1}) \\
 &= -\frac{1}{u_{-2}}\left(\frac{3}{2u_{-2}^2} + \frac{1}{2}\frac{3}{2u_{-2}^2} + \frac{-3}{4u_{-2}}\frac{3}{4u_{-2}} + \frac{-3}{2u_{-2}^2}\frac{-3}{2}\right) \\
 &= -\frac{1}{u_{-2}^3}\left(\frac{24}{16} + \frac{12}{16} - \frac{9}{16} + \frac{36}{16}\right) \\
 &= -\frac{63}{16u_{-2}^3} \\
 &= -\frac{63}{16(2i\sqrt{2a})^3} \\
 &= \frac{63}{256ia\sqrt{2a}} \\
 &= -\frac{63}{256a\sqrt{2a}} = -u_2
 \end{aligned}$$

$a=\frac{1}{8} \quad \approx -3.9375i$

und für  $n = 3$  ist

$$\begin{aligned}
 v_3 &= -\frac{1}{u_{-2}}\left((3-1)u_{3-1} + \sum_{k=0}^3 v_{k-1}u_{3-k-1}\right) \\
 &\approx -u_{-2}^{-4}\left(\underbrace{-\frac{63}{8} - \frac{1}{2}v_2}_{\frac{(4-1)63}{32}} - v_0v_1 - v_1v_0 - \frac{3}{2}v_2\right) \\
 &= -u_{-2}^{-4}\left(\frac{(4-1)63}{32} - 2\frac{-3}{4}\frac{-3}{2} - \frac{3}{2}\frac{-63}{16}\right) \\
 &= -\frac{-(4-1)63 - 8 \cdot 9 + 3 \cdot 63}{32u_{-2}^4} \\
 &= -\frac{-8 \cdot 9}{8 \cdot 4u_{-2}^4} \\
 &= \frac{9}{4u_{-2}^4}
 \end{aligned}$$

**Kommentar:** und analog, für  $n = 1$  und  $n = 2$

$$v_1 = -\frac{3}{2u_{-2}^2} = \frac{3}{16a} = -u_1 \quad \text{und} \quad v_2 = -\frac{63}{16u_{-2}^3} = -\frac{63i}{256a\sqrt{2a}} = -u_2.$$

Die letzten zwei Paare sind für die Berechnung nicht von bedeutung und dienen nur dazu, das Programm zu prüfen.

Für  $n > 0$  gilt  $v_{n-1} \stackrel{(5.9)}{=} -u_{n-1}$  und damit wollen wir die Formel noch weiter vereinfachen, um



eine Version zu bekommen, die sich gut implementieren lässt.

$$\begin{aligned}
 v_n &= -\frac{1}{u_{-2}} \left( (n-1)u_{n-1} + \underbrace{\sum_{k=0}^n v_{k-1}u_{n-k-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \right) \\
 &= -\frac{1}{u_{-2}} \left( \underbrace{(n-1)u_{n-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} + v_{-1} \underbrace{u_{n-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} + \left( \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1} \underbrace{u_{n-k-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \right) + v_{n-1}u_{-1} \right) \\
 &\stackrel{(5.9)}{=} -\frac{1}{u_{-2}} \left( \underbrace{-(n-1)v_{n-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} + v_{-1} \underbrace{(-v_{n-1})}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} + \left( \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1} \underbrace{(-v_{n-k-1})}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \right) + \underbrace{v_{n-1}u_{-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \right) \\
 &= -\frac{1}{u_{-2}} \left( -(n-1)v_{n-1} - \underbrace{\frac{1}{2}v_{n-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} - \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} - \underbrace{\frac{3}{2}v_{n-1}}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \right) \\
 &= \frac{1}{u_{-2}} \left( \left( n-1 + \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \right) v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} \right) \\
 &= \frac{1}{u_{-2}} \left( (n+1)v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} \right)
 \end{aligned}$$

Also, zu gegebenem  $u_{-2} = 2i\sqrt{2a}$ , sind die Koeffizienten gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 v_{-1} &= \frac{1}{2} & u_{-1} &= -\frac{3}{2} \\
 v_0 &= -u_0 = -\frac{3}{4u_{-2}} \\
 v_n &= -u_n = \frac{1}{u_{-2}} \left( (n+1)v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} \right) & \forall n > 0
 \end{aligned}$$

**Kommentar:** Um den Satz 5.8 anzuwenden, betrachten wir

$$\begin{aligned}
 \sqrt[n]{|v_n|} &= \sqrt[n]{\left| -\frac{i}{2\sqrt{2a}} \left( (n+1)v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} \right) \right|} \\
 &= \sqrt[n]{|u_{-2}|}^{-1} \sqrt[n]{\left| (n+1)v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} \right|}
 \end{aligned}$$

**Kommentar:** In einer geeigneten Programmiersprache ist es nun einfach die  $v_n$  und  $u_n$  Numerisch zu berechnen. So wird ein geeigneter Quellcode in Anhang C vorgestellt. Mit diesen Programm wurde für verschiedene  $a$  numerisch die Beträge der Koeffizienten berechnet und in abhängigkeit von  $n$  in Abbildung 5.7 dargestellt.

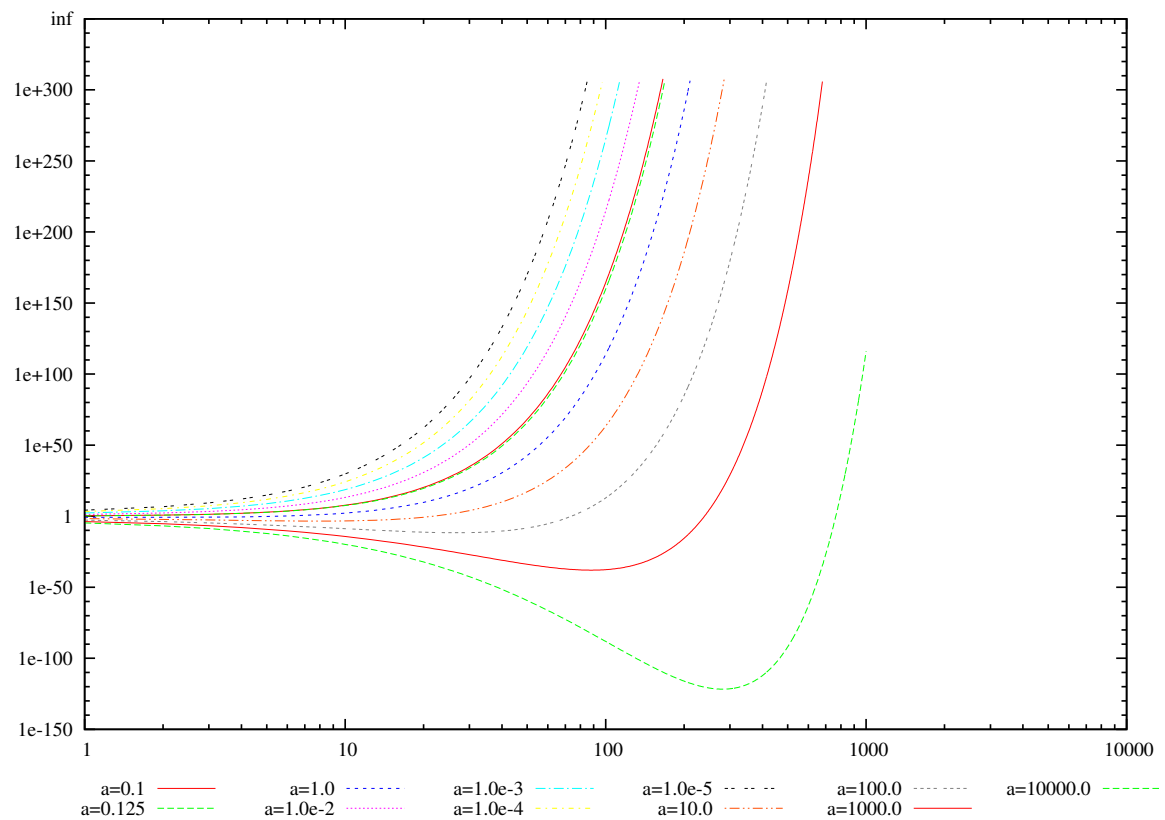
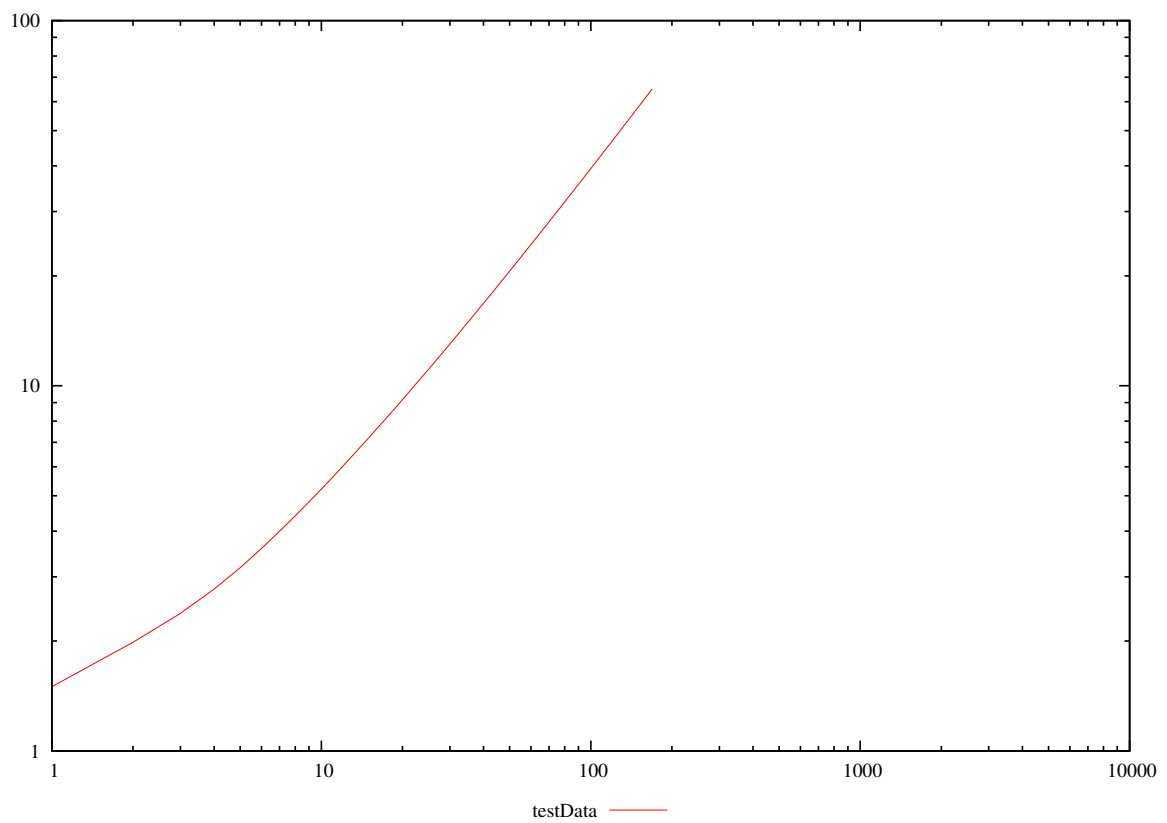
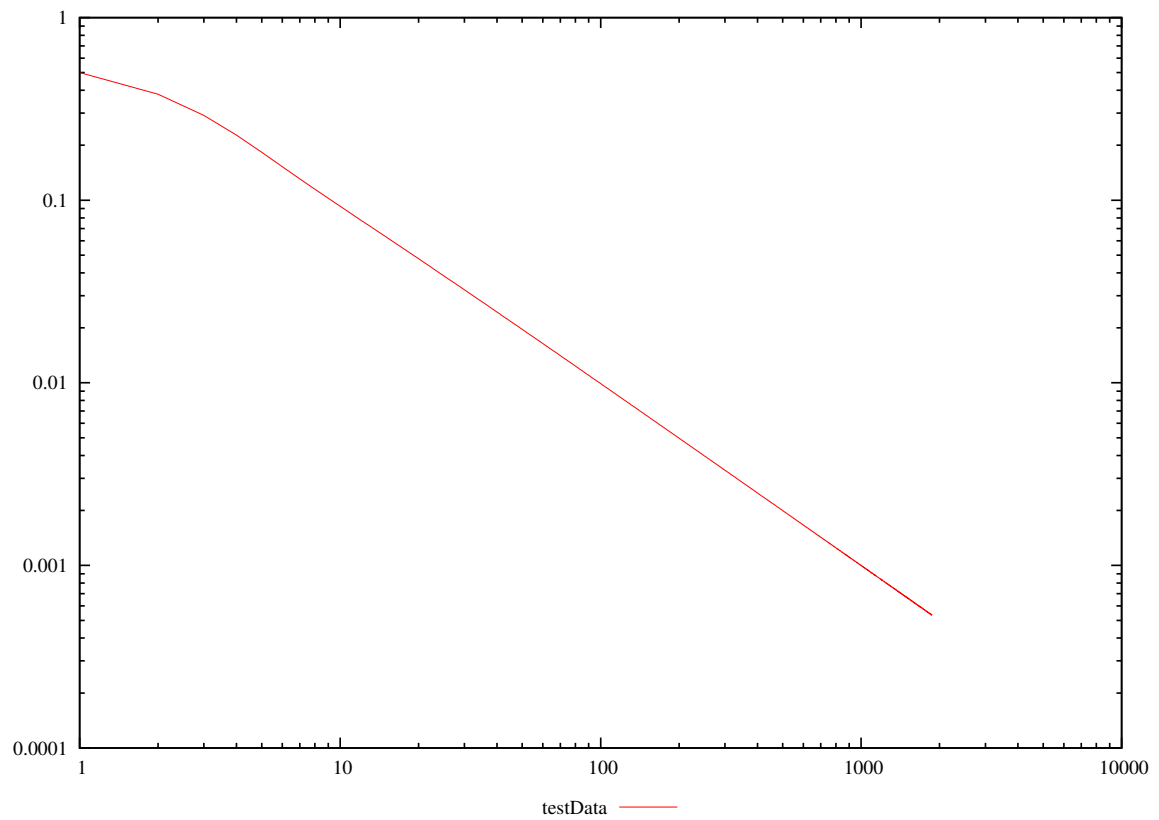


Abbildung 5.7: Die Beträge der Koeffizienten für unterschiedliche  $a$









## B Genaueres zu $(x^2 \partial_x)^k$

Nun wollen wir noch  $(x^2 \partial_x)^{k+1}$  besser verstehen.

$$\begin{aligned}
 (x^2 \partial_x)^{k+1} &= x^2 \underbrace{\partial_x x^2}_{2x + x^2 \partial_x} \partial_x (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= x^2 (2x + x^2 \partial_x) \partial_x (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= (2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2) (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= (2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2) (x^2 \partial_x) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (2x^3 \underbrace{\partial_x x^2}_{2x + x^2 \partial_x} \partial_x + x^4 \underbrace{\partial_x^2 x^2}_{2x \partial_x + 1 + x^2 \partial_x^2} \partial_x) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (2x^3 (2x + x^2 \partial_x) \partial_x + x^4 (2x \partial_x + 1 + x^2 \partial_x^2) \partial_x) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (4x^4 \partial_x + 2x^5 \partial_x^2 + 2x^5 \partial_x^2 + x^4 \partial_x + x^6 \partial_x^3) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (5x^4 \partial_x + 4x^5 \partial_x^2 + x^6 \partial_x^3) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= \sum_{n=1}^{k+1} \binom{k}{n-1} \frac{(k+1)!}{n!} x^{n+k} \partial_x^n
 \end{aligned}$$

Kommentar: Stirlingzahlen

also gilt für spezielle  $k$

$$(x^2 \partial_x)^{k+1} = \begin{cases} 2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2 & \text{falls } k = 1 \\ 5x^4 \partial_x + 4x^5 \partial_x^2 + x^6 \partial_x^3 & \text{falls } k = 2 \\ \sum_{n=1}^{k+1} \binom{k}{n-1} \frac{(k+1)!}{n!} x^{n+k} \partial_x^n & \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

## C Numerische berechnung der Koeffizienten

Hier nun ein Haskell Programm, dass in der Funktion **main** die Koeffizienten von  $v$  und  $u$  für Abschnitt 5.2.1 numerisch berechnet. Für die beispielhaften Berechnungen hier, wählen wir  $a = \frac{1}{8}$ , dadurch gilt  $u_{-2} = i$ .

```
1  import ComplRat
2  import Data.MemoTrie (memo) -- https://github.com/conal/MemoTrie
3
4  import System.IO
5  import System.Directory
6  import Control.Monad
7
8  -- returns array with the coefficients of v(t)
9  vKoeffs :: ComplRat -> [(Int, ComplRat)]
10 vKoeffs uMin2 = (-1,1/2+:0) : [(i, vKoeff i)|i <- [0..]]
11   where
12     -- returns n-th coefficient of v(t)
13     vKoeff :: Int -> ComplRat
14     vKoeff = memo vKoeff'
15     vKoeff' :: Int -> ComplRat
16     vKoeff' n | n > 0 = (vKoeff (n-1)*(fromIntegral n+1)+summe)/uMin2
17                 | n == 0 = -3/(uMin2*4)
18                 | n == -1 = 1/2
19                 | otherwise = 0
20                 where summe = sum [vKoeff (k-1)*(vKoeff (n-k-1))|k <- [1..n-1]]
21
22     -- returns n-th coefficient of u(t)
23     uKoeff :: Int -> ComplRat
24     uKoeff n | n == -2 = uMin2
25                 | n == -1 = -3/2
26                 | otherwise = -(vKoeff n)
27
28 -- returns array with the coefficients of u(t)
29 uKoeffs :: ComplRat -> [(Int, ComplRat)]
30 uKoeffs uMin2 = (-2,uMin2) : (-1,-3/2+:0) : (tail $ vKoeffs uMin2)
31
32 testRun :: ComplRat -> IO()
33 testRun uMin2 = do mapM_ putStrLn $ map show $ take 10 $ vKoeffs uMin2
34
35 {-run :: IO()-}
36 {-run = do mapM_ (genData 100) [(0+:1),(1+:0)]-}
```



```

37
38 genData :: Int -> ComplRat -> IO()
39 genData end uMin2 = do mapM_ addLine $ take end $ zip3 [0..] (tail vals) vals
40   where vals          = map snd $ vKoeffs uMin2
41         toDb1 x        = fromRational x :: Double
42         betrag (_,v,_)  = fromRational $ magnitude v
43         cauchy (i,v,_)  = (fromRational $ magnitude v)**(1/(fromIntegral i))
44         quot (_,v1,v2)  = sqrt $ toDb1 $ (magnitudeSq v2) / (magnitudeSq v1)
45         addLine (i,v1,v2) = putStrLn $ concat [ show i           , "\t"
46                                                  , show $ betrag (i,v1,v2) , "\t"
47                                                  , show $ cauchy (i,v1,v2) , "\t"
48                                                  , show $ quot (i,v1,v2)   , "\t"
49                                                  ]
50
51 saveData :: String -> Int -> ComplRat -> IO()
52 saveData fn end uMin2 = do fileExists <- doesFileExist fn
53                           when fileExists (removeFile fn)
54                           mapM_ addLine $ take end $ zip3 [0..] (tail vals) vals
55   where vals          = map snd $ vKoeffs uMin2
56         toDb1 x        = fromRational x :: Double
57         betrag (_,v,_)  = fromRational $ magnitude v
58         cauchy (i,v,_)  = (fromRational $ magnitude v)**(1/(fromIntegral i))
59         quot (_,v1,v2)  = sqrt $ toDb1 $ (magnitudeSq v2) / (magnitudeSq v1)
60         addLine (i,v1,v2) = do putStr $ show i ++ " "
61                               appendFile fn $ concat [ show i           , "\t"
62                                                         , show $ betrag (i,v1,v2) , "\t"
63                                                         , show $ cauchy (i,v1,v2) , "\t"
64                                                         , show $ quot (i,v1,v2)   , "\n"
65                                                         ]
66
67 -- #### old #####
68 --
69 {-import System.Environment (getArgs)-}
70
71 {-import System.IO-}
72 {-import System.Directory-}
73 {-import Control.Monad-}
74 -- | Writes the data to stdout
75 {-genData :: ComplRat -> Int -> Int -> IO()-}
76 {-genData uMin2 step num = do mapM_ addLine [i*step|i <- [1..num]]-}
77   {-where toDb1 x    = fromRational x :: Double-}
78         {-betrag i   = magnitude $ vKoeff uMin2 i-}
79         {-cauchy i   = (fromRational $ betrag i)**(1/(fromIntegral i))-}
80         {-quot i     = toDb1 $ (betrag (i-1)) / (betrag i)-}
81         {-addLine i = do putStr $ concat [ show i           , " "-}
82                                         {-[>, show $ toDb1 $ betrag i , " "<]-}
83                                         {-[>, show $ cauchy i           , " "<]-}
84                                         {-, show $ quot i           , "\n" ]-}
85
86 --- | Writes the data to file-}
87 {-genData' :: ComplRat -> Int -> IO()-}

```

```

88 {-genData' uMin2 n = do fileExists <- doesFileExist fn-}
89                               {-when fileExists (removeFile fn)-}
90                               {-mapM_ addLine [1..n]-}
91 {-where fn                    = "../img/data/test" -- a="++(show a)-}
92       {-toDb1 x               = fromRational x :: Double-}
93       {-betrag i              = magnitude $ vKoeff uMin2 i-}
94       {-cauchy i              = (fromRational $ betrag i)**(1/(fromIntegral i))-}
95       {-quot i                = toDb1 $ (betrag (i-1)) / (betrag i)-}
96       {-addLine i = do putStr $ show i ++ " "-}
97                               {-appendFile fn $ concat [ show i                      , " "-}
98                               {-, show $ toDb1 $ betrag i , " "-}
99                               {-, show $ cauchy i         , " "-}
100                              {-, show $ quot i           , "\n" ]-}

```

Ist der Code in einer Datei **/Pfad/zu/koeff.hs** gespeichert, so lässt er sich in Unix-Artigen Systemen beispielsweise mit den folgenden Befehlen compilieren und ausführen.

```

1 $ ghc /Pfad/zu/koeff.hs
2 $ ./Pfad/zu/koeff 15 20 30 40 50 100 150

```

Durch das Ausführen berechnet das Programm die Koeffizienten von  $v$  und  $u$  bis zum Index 15 sowie einzelne Werte an 20, 30, 40, 50, 100 und 150 und produziert einen Ausgang, der wie folgt aussieht

```

1  n      | v_n    u_n
2  -----+-----
3 -2      | 0.0 :+ 0.0    0.0 :+ 1.0
4 -1      | 0.5 :+ 0.0    (-1.5) :+ (-0.0)
5 0       | (-0.0) :+ 0.75    0.0 :+ (-0.75)
6 1       | 1.5 :+ 0.0    (-1.5) :+ (-0.0)
7 2       | 0.0 :+ (-3.9375)    (-0.0) :+ 3.9375
8 3       | (-13.5) :+ (-0.0)    13.5 :+ 0.0
9 4       | 0.0 :+ 59.34375    (-0.0) :+ (-59.34375)
10 5      | 324.0 :+ 0.0    (-324.0) :+ (-0.0)
11 6      | 0.0 :+ (-2122.98046875)    (-0.0) :+ 2122.98046875
12 7      | (-16213.5) :+ (-0.0)    16213.5 :+ 0.0
13 8      | 0.0 :+ 141115.447265625    (-0.0) :+ (-141115.447265625)
14 9      | 1376311.5 :+ 0.0    (-1376311.5) :+ (-0.0)
15 10     | 0.0 :+ (-1.4850124677246094e7)    (-0.0) :+ 1.4850124677246094e7
16 11     | (-1.75490226e8) :+ (-0.0)    1.75490226e8 :+ 0.0
17 12     | 0.0 :+ 2.2530628205925293e9    (-0.0) :+ (-2.2530628205925293e9)
18 13     | 3.1217145174e10 :+ 0.0    (-3.1217145174e10) :+ (-0.0)
19 14     | 0.0 :+ (-4.641652455250599e11)    (-0.0) :+ 4.641652455250599e11
20 15     | (-7.3709524476135e12) :+ (-0.0)    7.3709524476135e12 :+ 0.0
21 20     | 0.0 :+ 1.753906248830001e19    (-0.0) :+ (-1.753906248830001e19)
22 30     | 0.0 :+ (-2.7520294973343126e33)    (-0.0) :+ 2.7520294973343126e33
23 40     | 0.0 :+ 1.1055855646065139e49    (-0.0) :+ (-1.1055855646065139e49)
24 50     | 0.0 :+ (-5.0878905001062135e65)    (-0.0) :+ 5.0878905001062135e65
25 100    | 0.0 :+ 3.045728894141079e159    (-0.0) :+ (-3.045728894141079e159)
26 150    | 0.0 :+ (-2.7737283214890534e264)    (-0.0) :+ 2.7737283214890534e264

```

In Haskell ist das `:+` ein Infix-Konstruktor der Klasse **Data.Complex**. So erzeugt ein Aufruf der Form `a :+ b` eine Imaginärzahl, die  $a + ib$  entspricht.

Übersetzt in unsere Zahlenschreibweise sieht das Ergebnis also wie folgt aus:

n	$v_n$	$u_n$
-2	0	$i$
-1	0,5	-1,5
0	$0,75i$	$-0,75i$
1	1,5	-1,5
2	$-3,9375i$	$3,9375i$
3	-13,5	13,5
4	$59,34375i$	$-59,34375i$
5	324,0	-324,0
6	$-2122,98046875i$	$2122,98046875i$
7	-16213,5	16213,5
8	$141115,447265625i$	$-141115,447265625i$
9	1376311,5	-1376311,5
10	$-1,4850124677246094 \cdot 10^7 i$	$1,4850124677246094 \cdot 10^7 i$
11	$-1,75490226 \cdot 10^8$	$1,75490226 \cdot 10^8$
12	$2,2530628205925293 \cdot 10^9 i$	$-2,2530628205925293 \cdot 10^9 i$
13	$3,1217145174 \cdot 10^{10}$	$-3,1217145174 \cdot 10^{10}$
14	$-4,641652455250599 \cdot 10^{11} i$	$4,641652455250599 \cdot 10^{11} i$
15	$-7,3709524476135 \cdot 10^{12}$	$7,3709524476135 \cdot 10^{12}$
⋮	⋮	⋮
20	$1.753906248830001 \cdot 10^{19} i$	$-1.753906248830001 \cdot 10^{19} i$
⋮	⋮	⋮
30	$-2.7520294973343126 \cdot 10^{33} i$	$2.7520294973343126 \cdot 10^{33} i$
⋮	⋮	⋮
40	$1.1055855646065139 \cdot 10^{49} i$	$-1.1055855646065139 \cdot 10^{49} i$
⋮	⋮	⋮
50	$-5.0878905001062135 \cdot 10^{65} i$	$5.0878905001062135 \cdot 10^{65} i$
⋮	⋮	⋮
100	$3.045728894141079 \cdot 10^{159} i$	$-3.045728894141079 \cdot 10^{159} i$
⋮	⋮	⋮
150	$-2.7737283214890534 \cdot 10^{264} i$	$2.7737283214890534 \cdot 10^{264} i$
⋮	⋮	⋮

Tabelle C.1: Numerisch berechnete Koeffizienten von  $u(t)$  und  $v(t)$  für  $a = \frac{1}{8}$

# Literaturverzeichnis

- [Ara] D. Arapura, *Notes on  $d$ -modules and connections with hodge theory*, Notizen?
- [Ark12] S. Arkhipov,  *$D$ -modules*, unpublished lecture notes available online, May 2012.
- [AV09] B. Alkofer and F. Vogl, *Lineare differentialgleichungen und deren fouriertransformierte aus algebraischer sicht / lineare differentialgleichungen aus algebraischer sicht*, 2009.
- [Ayo09] J. Ayoub, *Introduction to algebraic  $d$ -modules*, Vorlesungsskript, 2009.
- [BD04] A. Beilinson and V.G. Drinfeld, *Chiral algebras*, Colloquium Publications - American Mathematical Society, no. Bd. 51, American Mathematical Society, 2004.
- [Blo04] Spencer Bloch, *Local fourier transforms and rigidity for  $d$ -modules*, Asian J. Math (2004), 587–605.
- [Cou95] S.C. Coutinho, *A primer of algebraic  $d$ -modules*, London Mathematical Society Student Texts, Cambridge University Press, 1995.
- [Ell10] C. Elliott,  *$D$ -modules*, unpublished notes available online, April 2010.
- [Gin98] V. Ginzburg, *Lectures on  $d$ -modules*, Vorlesungsskript, 1998.
- [GL04] Ricardo García López, *Microlocalization and stationary phase*, Asian J. Math. **8** (2004), no. 4, 747–768. MR MR2127946 (2005m:32014)
- [Har77] R. Hartshorne, *Algebraic geometry*, Graduate Texts in Mathematics, Springer, 1977.
- [Hei10] Hedwig Heizinger, *Verschwindungszykel regulär singulärer  $D$ -Moduln und Fouriertransformation*, 2010.
- [HTT07] R. Hotta, K. Takeuchi, and T. Tanisaki,  *$D$ -modules, perverse sheaves, and representation theory*, Progress in Mathematics, Birkhäuser Boston, 2007.
- [Hut07] Graham Hutton, *Programming in Haskell*, Cambridge University Press, January 2007.
- [Kas03] M. Kashiwara,  *$D$ -modules and microlocal calculus*, Translations of Mathematical Monographs, American Mathematical Society, 2003.

- [Kno64] Konrad Knopp, *Theorie und anwendung der unendlichen reihen*, Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften, Springer, Berlin, 1964.
- [MR89] H. Matsumura and M. Reid, *Commutative ring theory*, Cambridge Studies in Advanced Mathematics, Cambridge University Press, 1989.
- [Sab90] C. Sabbah, *Introduction to algebraic theory of linear systems of differential equations*, Vorlesungsskript, 1990.
- [Sab07] ———, *An explicit stationary phase formula for the local formal Fourier-Laplace transform*, June 2007.
- [Sch] J.P. Schneiders, *An introduction to d-modules*.
- [Sta12] The Stacks Project Authors, *Stacks Project*, <http://stacks.math.columbia.edu>, December 2012.

Kommentar: TODO: Erklärung das das wirklich selbstgemacht ist