

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: 12. Mai 2013

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	v
0 Mathematische Grundlagen	1
1 Moduln über \mathcal{D}_k	5
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
2 Meromorphe Zusammenhänge	12
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 ℓ -Symbol	23
2.4 Formale Struktur regulärer Zusammenhänge	25
2.5 pull-back und push-forward	25
2.6 Fouriertransformation	33
3 Elementare Meromorphe Zusammenhänge	34
3.1 Defnintion in [Sab07]	38
3.2 Twisten von Meromorphen Zusammenhängen	39
4 Levelt-Turrittin-Theorem	40
4.1 Klassische Version	40
4.2 Sabbah's Refined version	42

5	DIE Klasse der Fourier-Transformationen	43
5.1	Rezept für allgemeine φ	43
5.2	Levelt-Turritin-Zerlegung für \mathcal{M}_φ mit $\varphi_1 := \frac{a}{x}$	50
5.2.1	Konvergenz der Summanten	58
	Anhang	59
A	Aufteilung von $t\varphi'(t)$	61
B	Genaueres zu $(x^2\partial_x)^k$	62
C	Numerische berechnung der Koeffizienten	63

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_φ	47
5.2	Newton Polygon zu P_φ	50
5.3	Newton Polygon zu ρ^*P_φ	51
5.4	Newton Polygon zu \mathcal{N}	53
5.5	Newton-Polygon zu Q_1	55
5.6	Newton-Polygon zu Q_2	55
5.7	Koeffizienten in abhängigkeit von a	60

Tabellenverzeichnis

C.1	Numerisch berechnete Koeffizienten von $u(t)$ und $v(t)$ für $a = \frac{1}{8}$	65
-----	--	----

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 ($\widehat{}$) 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

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

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 ∂_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 $k = \widehat{K} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}[[x]][x^{-1}]$ ^[1].

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"

□

^[1]Wird mit $\widehat{\mathcal{D}}_{\widehat{K}}$ bezeichnet, in [AV09].

Kommentar: Gilt das folgende??

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

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 ∂_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 Θ_X die Garbe der Vektorfelder über X . Es gilt, dass Θ_X in \mathcal{D}_X enthalten ist. Bemerke auch, dass Θ_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 ∂_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 genertierter \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 endlichen 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)

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

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 ∂ 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 ∂ 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}, ∂) 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 φ 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 ∂_1 und ∂_2 zwei darauf definierte Derivationen. So gilt, die Differenz zweier Derivationen ist K -linear.*

Beweis. Seien ∂_1 und ∂_2 zwei Derivationen auf \mathcal{M}_K . Da ∂_1 und ∂_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.

$$\begin{aligned} (\partial_1 - \partial_2)(fu) &= \partial_1(fu) - \partial_2(fu) \\ &= f'u + f\partial_1u - f'u - f\partial_2u \\ &= \underbrace{f'u - f'u}_{=0} + f \cdot (\partial_1u - \partial_2u) \\ &= f \cdot (\partial_1 - \partial_2)(u) \end{aligned}$$

□

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

Beweis. Es sei (K^r, ∂) 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

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

mit φ, ψ 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 ∂ 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.

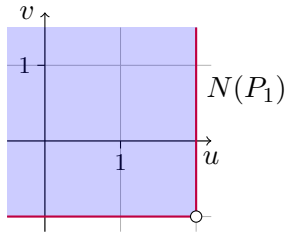


Abbildung 2.1: Newton-Polygon zu $P_1 = x\partial_x^2$

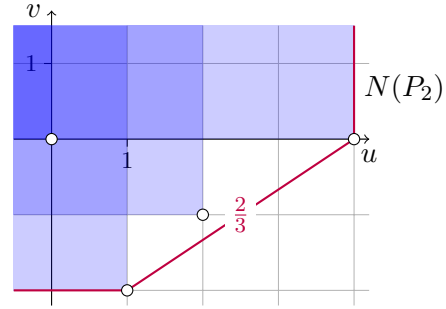


Abbildung 2.2: Newton-Polygon zu P_2

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

$$\left((q, p - q) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \supset \left((k, l - k) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right),$$

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:

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

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

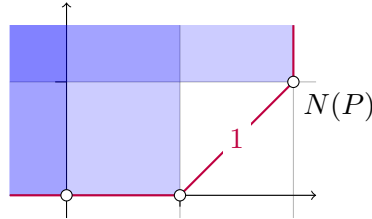


Abbildung 2.3: Newton Polygon zu $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$

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

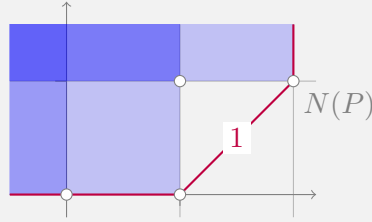


Abbildung 2.4: Newton Polygon zu P

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 ℓ -Symbol

Kommentar: TODO: mache alle Linearform L zu ℓ

Sei $\Lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \in \mathbb{Q}_{\geq 0}$ vollständig gekürzt, also mit λ_0 und λ_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 (ℓ -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 ∂_x in dem Ring durch ξ , 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 $gr_{\text{ord}_{\ell}(P)}^{\ell V} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$. σ_{ℓ} wir hierbei als das ℓ -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 ℓ 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 ℓ -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 Λ entstanden ist, so gilt

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

Kommentar: TODO: ist ℓ 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 ∇ .

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 ∂_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 ∂_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 Φ 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 Φ 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

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

$$\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}$$

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 Φ 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 $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1)$.

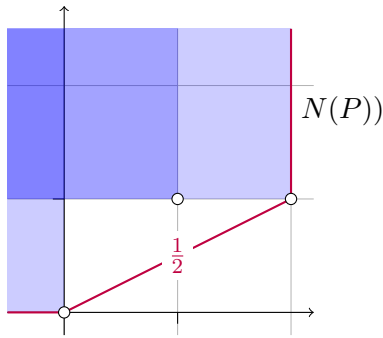


Abbildung 2.5: Newton Polygon zu
 $P = x^3 \partial_x^2 - 4x^2 \partial_x - 1$

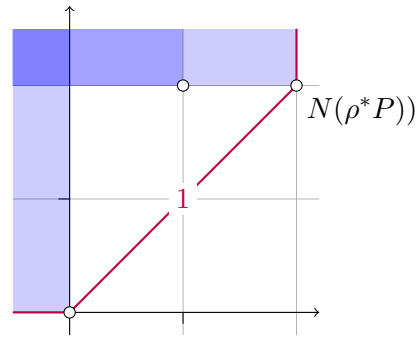
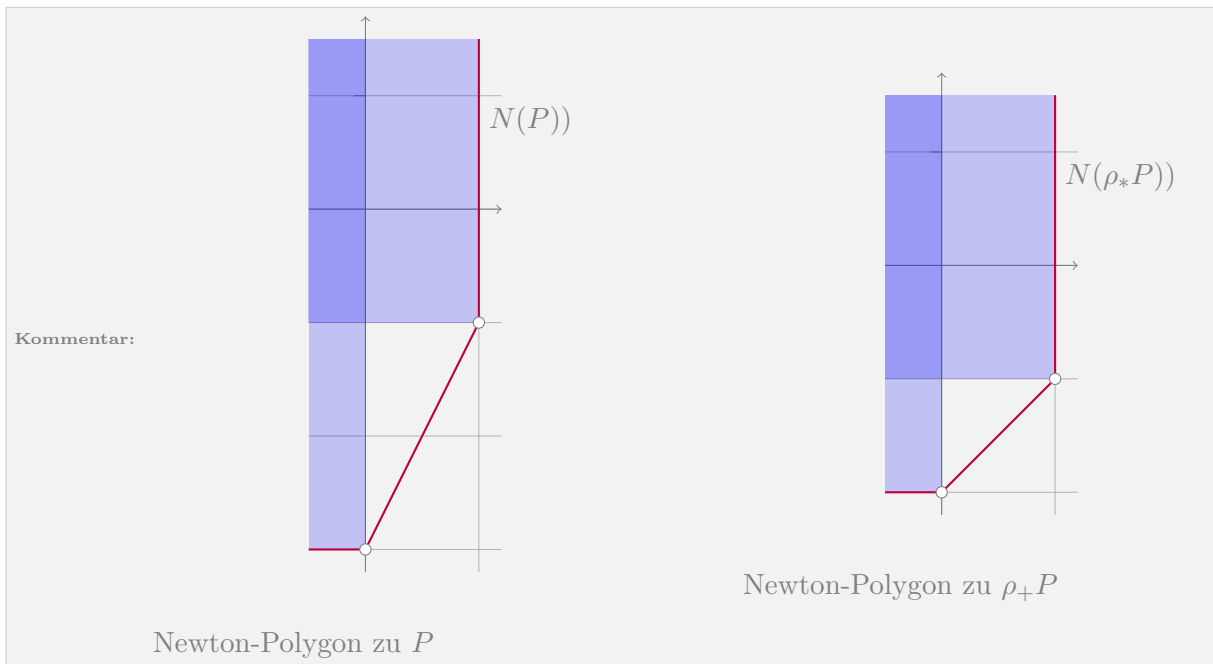


Abbildung 2.6: Newton Polygon zu
 $\rho^+ P = \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1$

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 ∂_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 ρ , 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^φ 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}^φ). *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}^φ 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 ∂_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 ∇ , 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 ζ 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 φ . (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 Λ 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 β_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

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

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 Λ nicht ganzzahlig. Mache deshalb einen pull-back mit λ_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. φ (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 φ D-Moduln ergibt. Im Laufe des Kapitels werden immer speziellere φ betrachtet und zuletzt wird für konkrete Beispiele eine explizite Rechnung gegeben.

5.1 Rezept für allgemeine φ

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}^φ . 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}^φ 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 ∂_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_φ assoziierten 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}_φ 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

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

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

□

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.

Ab jetzt nur noch für den Spezialfall $\varphi = \frac{a}{t^q}$. Also sei $\mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi$ mit

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

so dass

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

Kommentar: Allgemeiner? für allgemeine φ ??

Beweis. [Sab07, 5.b.] Um zu zeigen, dass die Behauptung gilt, formen wir P_φ um und isolieren die Monome, die für das Newton-Polygon von Bedeutung sind und vernachlässigt werden können. Sei $q := \max(I)$.

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

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

Nun wollen wir noch zeigen, dass die Summe auch vernachlässigt werden kann, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Das erste Monom liefert den Quadranten, der links über $(q+1, q)$ ist. Das zweite Monom liefert $\mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0}$, also den Quadranten, der links über $(0, 0)$ liegt. Damit sieht das zu diesen beiden Monomen zugehörige Newton-Polygon, wie in Abbildung 5.1 aus. Betrachte nun, zu einem $m \in I \setminus \{q\}$, einen Summanden $ma_m(-x^2\partial_x)^{q-m}$ aus der Summe:

$$\begin{aligned} N(ma_m(-x^2\partial_x)^{q-m}) &= N(ma_m(-1)^q(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m} + \mathbf{T.i.Q. von } x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m})) \\ &= N(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m}) \end{aligned}$$

Offensichtlich sind die Quadranten, die zu den Summanden gehören ebenfalls schon in der zu $x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa_q$ zugehörigen Konvexen Hülle enthalten. Also ist

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

womit die Behauptung folgt.

Kommentar:

$$\begin{aligned} N(P_\varphi(x, \partial_x)) &= N\left(\underbrace{(-x^2\partial_x)^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}}(x\partial_x - 1) + qa\right) \\ &= N\left(\underbrace{(-1)^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}} \underbrace{(x^{2q}\partial_x^q + \mathbf{T.i.Q. von } x^{2q}\partial_x^q)}_{\text{liefere keinen Beitrag}}(x\partial_x - 1) + qa\right) \\ &= N\left(\underbrace{x^{2q}\partial_x^q(x\partial_x - 1)}_{\text{liefert keinen Beitrag}} + qa\right) \\ &= N\left(\underbrace{x^{2q}\partial_x^q x \partial_x - x^{2q}\partial_x^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}} + qa\right) \\ &= N\left(\underbrace{x^{2q}(x\partial_x^q + q\partial_x^{q-1})\partial_x - x^{2q}\partial_x^q}_{\text{liefert keinen Beitrag}} + qa\right) \\ &= N\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + \underbrace{qx^{2q}\partial_x^q - x^{2q}\partial_x^q}_{\substack{\text{im Quadranten von } x^{2q+1}\partial_x^{q+1}, \\ \text{sind also vernachlässigbar}}} + qa\right) \\ &= N\left(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + qa\right) \end{aligned}$$

Wobei hier das **T.i.Q.** eine Abkürzung für *Therme im Quadranten* ist. Hier ist ein Term $\varepsilon x^p \partial_x^q$, mit $\varepsilon \in \mathbb{C}, p, q \in \mathbb{Z}$, im Quadranten von $\tilde{\varepsilon} x^{\tilde{p}} \partial_x^{\tilde{q}}$, mit $\tilde{\varepsilon} \in \mathbb{C}, \tilde{p}, \tilde{q} \in \mathbb{Z}$, falls $q > \tilde{q}$ und $p - q < \tilde{p} - \tilde{q}$. Anschaulich bedeutet das, dass

$$\left((q, p - q) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \supset \left((\tilde{q}, \tilde{p} - \tilde{q}) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right).$$

Offensichtlich ist damit $N(\varepsilon x^p \partial_x^q + \tilde{\varepsilon} x^{\tilde{p}} \partial_x^{\tilde{q}}) = N(\varepsilon x^p \partial_x^q)$, also können Terme, die sich bereits im Quadranten eines anderen Terms befinden, vernachlässigt werden, wenn das Newton-Polygon gesucht ist. \square

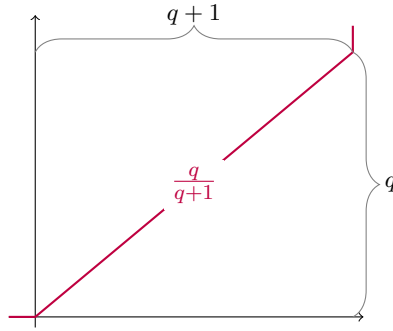


Abbildung 5.1: Newton-Polygon zu P_φ

Also ist, nach Lemma 2.49, ein pull-back mit Grad $q + 1$ hinreichend, um einen ganzzahligen Slope zu bekommen. Sei $\rho : t \mapsto x := -(q + 1)t^{q+1}$ so ist

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

mit $\mathcal{P}(\rho^+ \mathcal{M}_\varphi) = \{q\} \subset \mathbb{N}$. 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 β 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 5.3. *Sei e ein zyklischer Vektor zu $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi$, so ist $e \otimes \underbrace{1}_{\in \widehat{L}} \in \mathcal{N}$ ein zyklischer Vektor für $\mathcal{N} \stackrel{\text{def}}{=} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes_{\widehat{L}} \mathcal{E}_{\widehat{L}}^\psi$.*

Beweis. Es sei 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 $e \otimes 1, \partial_t(e \otimes 1), \partial_t^2(e \otimes 1), \dots, \partial_t^q(e \otimes 1)$ ein linear unabhängiges System ist. Es gilt

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

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

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 5.4. [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

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

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 Summanten lässt sich nun Induktion anwenden.

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

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

$$\begin{aligned}
 P_\varphi(x, \partial_x) &= -x^2 \partial_x (x \partial_x - 1) + a \\
 &= -x^2 \underbrace{\partial_x x}_{=1} \partial_x + x^2 \partial_x + a \\
 &= -x^2 \underbrace{(x \partial_x + 1)}_{=x^2 \partial_x^2 - x^2 \partial_x + x^2 \partial_x + 1} \partial_x + x^2 \partial_x + a \\
 &= -x^3 \partial_x^2 - x^2 \partial_x + x^2 \partial_x + a \\
 &= -x^3 \partial_x^2 + a
 \end{aligned}$$

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

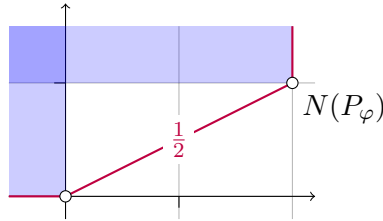
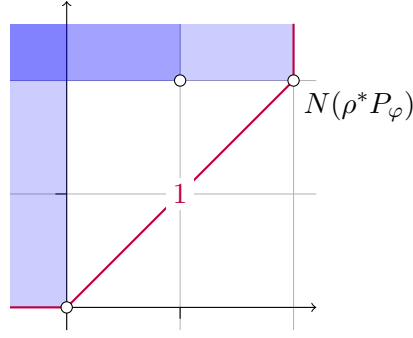


Abbildung 5.2: Newton Polygon zu P_φ

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

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

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 ρ^*P_φ

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 ρ^*P_φ .

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

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 \mathcal{M} . Es ist $\mathbf{e} \otimes 1$ ein zyklischer Vektor, wobei \mathbf{e} ein zyklischer Vektor von $\rho^+\mathcal{M}$ ist. Somit existieren $a_0(t)$ und $a_1(t)$ in \widehat{L} , so dass

$$0 = \partial_t^2(\mathbf{e} \otimes 1) + (a_1(t)\partial_t + a_0(t))\mathbf{e} \otimes 1$$

und damit ist dann $\mathcal{N} = \mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot (\partial_t^2 + a_1(t)\partial_t + a_0(t))$. Es ist

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

$$\begin{aligned}
 &= \overbrace{((t^{-1}\partial_t - 2at^{-4})\mathbf{e}) \otimes 1} + \overbrace{2\psi'(t)(\partial_t\mathbf{e}) \otimes 1} + \overbrace{(\psi''(t) + \psi'(t)^2)\mathbf{e} \otimes 1} \\
 &= \overbrace{(t^{-1}\partial_t\mathbf{e}) \otimes 1 - 2at^{-4}\mathbf{e} \otimes 1} + \overbrace{2\psi'(t)(\partial_t\mathbf{e}) \otimes 1 + (\psi''(t)\mathbf{e} \otimes 1 + \psi'(t)^2\mathbf{e} \otimes 1)} \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t\mathbf{e}) \otimes 1}_{=0} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)\mathbf{e} \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t(\mathbf{e} \otimes 1) - \mathbf{e} \otimes \psi'(t))}_{=0} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)\mathbf{e} \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t(\mathbf{e} \otimes 1) - (\psi'(t)t^{-1} + 2\psi'(t)^2)\mathbf{e} \otimes 1 \\
 &\quad + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)\mathbf{e} \otimes 1 \\
 &= \left((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2\psi'(t)^2 - 2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2 \right) \mathbf{e} \otimes 1 \\
 &= \left((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2at^{-4} + \psi''(t) - \psi'(t)^2 \right) \mathbf{e} \otimes 1
 \end{aligned}$$

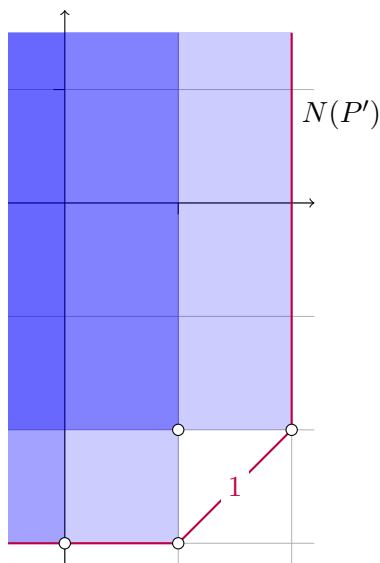
also

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

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

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

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

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

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 ∂_t -Grad von P' genau 2 ist, müssen die Q_i jeweils den Grad 1 haben, um eine nichttriviale Zerlegung zu bekommen.

Beobachtung 5.5. 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

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

Mit der Beobachtung 5.5 ist klar, dass wir den Faktor vor den ∂_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

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

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

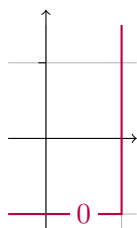
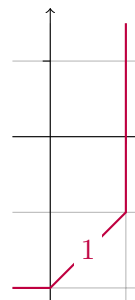
Durch das Wissen über die Slopes der Q_i erhalten wir noch Informationen über die Reihen $v(t) := \sum_n v_n t^n$ bzw. $u(t) := \sum_n u_n t^n$. Die beiden Polynome Q_1 und Q_2 enthalten ∂_t als einziges Monom vom ∂_t -Grad 1, deshalb ist $(1, -1)$ in beiden zugehörigen Newton-Polygonen enthalten. Da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

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

und mit den Kommutatorregeln gilt

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


 Abbildung 5.5: Newton-Polygon zu Q_1

 Abbildung 5.6: Newton-Polygon zu Q_2

$$= \sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n \partial_t + \sum_{n=-2}^{\infty} n u_n t^{n-1}$$

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:

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

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 den gewünschten Ergebnis 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} :

$$\begin{aligned}
 -3i\sqrt{2a} &= (-2)u_{-2} + \sum_{k=0}^0 v_{k-1} u_{-3-k+1} \\
 &= -2u_{-2} + v_{-1} u_{-2} \\
 &\stackrel{(5.7)}{=} -2 \cdot 2i\sqrt{2a} + v_{-1} 2i\sqrt{2a} \\
 \stackrel{a \neq 0}{\Rightarrow} v_{-1} &= \frac{4i\sqrt{2a} - 3i\sqrt{2a}}{2i\sqrt{2a}} \\
 &= \frac{1}{2}
 \end{aligned}$$

und somit

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

$$\Rightarrow u_{-1} = -\frac{3}{2}$$

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

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

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

Kommentar: TODO: mapsto pfeil?

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

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

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

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 $\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)}$:

$$\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)} = \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_2(t, \partial_t - i\sqrt{2a}t^{-2})$$

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

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

$$\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = (\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q_1 \otimes \mathcal{E}^{-\psi(t)}) \oplus (\mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\partial_t + \sum_{n=-1}^{\infty} u_n t^n) \otimes \mathcal{E}^{\psi(t)}).$$

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.

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

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

und analog, für $n = 1$ und $n = 2$

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

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.

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

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 diesem Programm wurde für verschiedene a numerisch die Beträge der Koeffizienten berechnet und in Abhängigkeit von n in Abbildung 5.7 dargestellt.

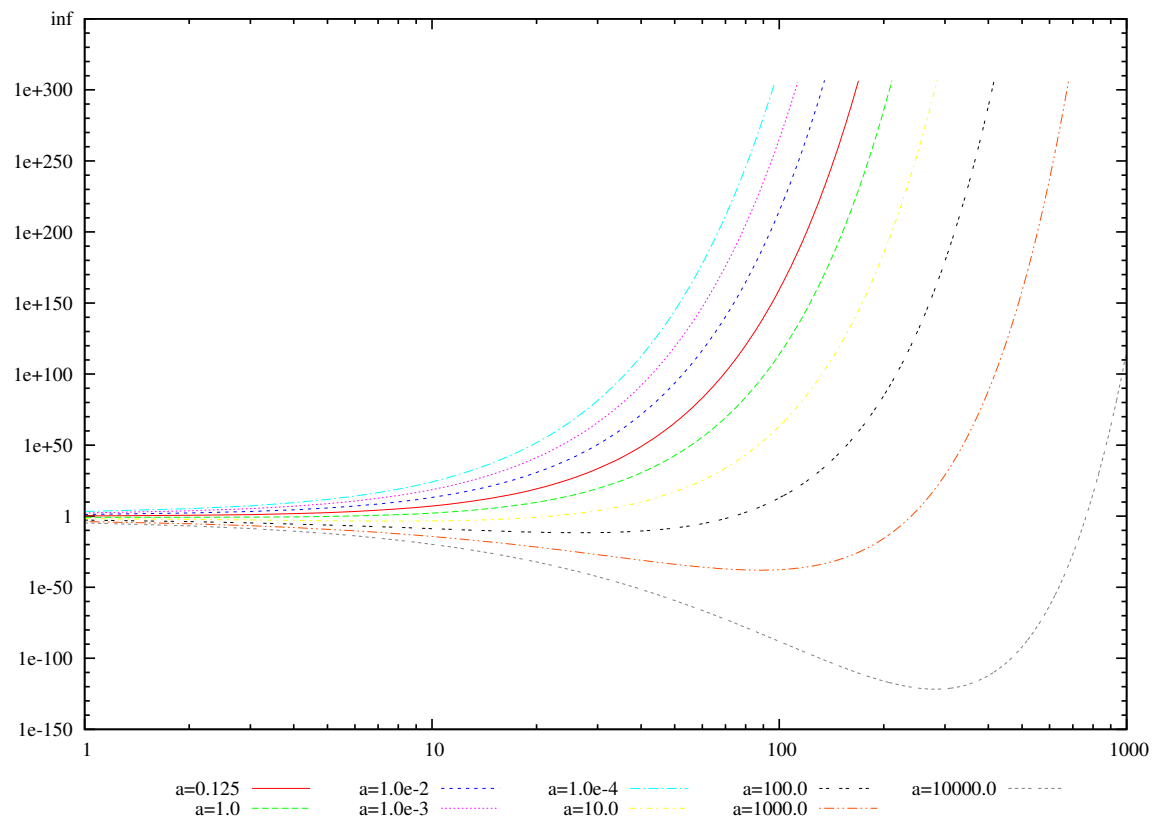


Abbildung 5.7: Die Beträge der Koeffizienten für unterschiedliche a

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 Data.Complex (Complex( (:+ ) ))
2  import Data.MemoTrie (memo) -- https://github.com/conal/MemoTrie
3  import System.Environment (getArgs)
4
5  -- Parameter
6  a = 1/8
7
8  -- returns n-th coefficient of v(t)
9  vKoeff :: Int -> Complex Double
10 vKoeff = memo vKoeff'
11   where vKoeff' :: Int -> Complex Double
12         vKoeff' n
13           | n > 0    = ((fromIntegral n+1)*(vKoeff (n-1))+summe)/(uKoeff (-2))
14           | n == 0   = -3/(uKoeff (-2)*4)
15           | n == -1  = 1/2
16           | otherwise = 0
17         where summe = sum [vKoeff (k-1)*(vKoeff (n-k-1)) | k <- [1..n-1]]
18
19 -- returns n-th coefficient of u(t)
20 uKoeff :: Int -> Complex Double
21 uKoeff n | n == -2    = 0:(sqrt(8*a))
22          | n == -1    = -3/2
23          | otherwise  = -(vKoeff n)
24
25 main :: IO ()
26 main = do args <- getArgs
27         putStrLn ("n \t| v_n      u_n\n-----+)+(replicate 70 '-'))
28         mapM_ (putStrLn . formatted) [-2..(read $ head args :: Int)]
29         mapM_ (putStrLn . formatted) $ map (\x -> read x :: Int) (tail args)
30   where formatted :: Int -> String
31         formatted i = concat [ show i, " \t| " , show $ vKoeff i, "      "
32                               , show $ uKoeff i ]
```

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	$0,75i$	-0,75 <i>i</i>
1	1,5	-1,5
2	-3,9375 <i>i</i>	3,9375 <i>i</i>
3	-13,5	13,5
4	59,34375 <i>i</i>	-59,34375 <i>i</i>
5	324,0	-324,0
6	-2122,98046875 <i>i</i>	2122,98046875 <i>i</i>
7	-16213,5	16213,5
8	141115,447265625 <i>i</i>	-141115,447265625 <i>i</i>
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	$-7,3709524476135 \cdot 10^{12}$	$7,3709524476135 \cdot 10^{12}$
\vdots	\vdots	\vdots
20	$1.753906248830001 \cdot 10^{19} i$	$-1.753906248830001 \cdot 10^{19} i$
\vdots	\vdots	\vdots
30	$-2.7520294973343126 \cdot 10^{33} i$	$2.7520294973343126 \cdot 10^{33} i$
\vdots	\vdots	\vdots
40	$1.1055855646065139 \cdot 10^{49} i$	$-1.1055855646065139 \cdot 10^{49} i$
\vdots	\vdots	\vdots
50	$-5.0878905001062135 \cdot 10^{65} i$	$5.0878905001062135 \cdot 10^{65} i$
\vdots	\vdots	\vdots
100	$3.045728894141079 \cdot 10^{159} i$	$-3.045728894141079 \cdot 10^{159} i$
\vdots	\vdots	\vdots
150	$-2.7737283214890534 \cdot 10^{264} i$	$2.7737283214890534 \cdot 10^{264} i$
\vdots	\vdots	\vdots

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.

- [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