Bachelorarbeit

Explizite Berechnung der Levelt-Turrittin-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: 21. Mai 2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einleitung

0 Mathematische Grundlagen

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

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

- $\mathbb{C}[x] := \{\sum_{i=1}^{N} a_i x^i | N \in \mathbb{N}\}$ die einfachen Potenzreihen
- $\mathbb{C}\{x\} := \{\sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i |\text{pos. Konvergenzradius}\}$ ([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 Inclulsionen $\mathbb{C}[x] \subsetneq \mathbb{C}\{x\} \subsetneq \mathbb{C}[\![x]\!]$ und $K \subsetneq \widehat{K}$ gelten.

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

Für $v = (v_1, \dots, v_n)$ ein Vektor, bezeichnet

$$^t v := \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

den Transponierten Vektor. Es bezeichnet $M(n \times m, k)$ die Menge der n mal m Dimensionalen Matritzen mit Einträgen in k.

Sei R ein Ring, dann bezeichnet $R^\times$ die Einheitengruppe von R.

Definition 0.1 (Direkte Summe)**.** [Sta12, 4(Categories).5.1] Seien $x, y \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$, eine *Direkte Summe* oder das *coprodukt* von x und y ist ein Objekt $x \oplus y \in \mathrm{Ob}(\mathcal{C})$ zusammen mit Morphismen $i \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(x, x \oplus y)$ und $j \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(y, x \oplus y)$ so dass die folgende universelle Eigenschaft gilt: für jedes $w \in Ob(\mathcal{C})$ mit Morphismen $\alpha \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(x, w)$ und $\beta \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(y, w)$ existiert ein eindeutiges $\gamma \in \mathrm{Mor}_{\mathcal{C}}(x \oplus y, w)$ so dass das Diagram

$$\begin{tikzcd}
 & y \arrow[d, "j"'] \arrow[ddr, "\beta"] & \\
x \arrow[r, "i"] \arrow[drr, "\alpha"'] & x \oplus y \arrow[dr, dashed, "\exists!\gamma"] & \\
 & & w
\end{tikzcd}$$

kommutiert.

Definition 0.2 (Tensorprodukt)**.** [Sta12, 3(Algebra).11.21]

$$\begin{tikzcd}
M \times N \arrow[r] \arrow[dr, "f"'] & M \otimes_R N \arrow[d, dashed, "\exists!\gamma"] \\
 & T
\end{tikzcd}$$

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

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

Bemerkung 0.3. Hier ein paar Rechenregeln für das Tensorprodukt,

$$(M \otimes_R N) \otimes_S L \cong M \otimes_R (N \otimes_S L) \tag{0.1}$$

$$M \otimes_R R \cong M \tag{0.2}$$

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

$$N \otimes_R (M/\operatorname{im}(f)) \cong N \otimes_R M/\operatorname{im}(\mathrm{id}_R \otimes f) \tag{0.3}$$

Definition 0.4 (Exacte 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 $\operatorname{im}(f_{i-1}) = \ker f_i$.

Definition 0.5 (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 0.6 (Kokern)**.** Ist $f : M' \to M$ eine Abbildung, so ist der *Kokern* von f definiert als $\operatorname{coker}(f) = M/\operatorname{im}(f)$.

Proposition 0.7. *Ist $f : M' \to M$ eine injektive Abbildung, so ist*

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

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

Beweis. □

Kommentar:

Definition 0.8 (Filtrierung)**.** [Sta12, Def 10.13.1.] [Ell10, Rem 2.5.] Eine *aufsteigende Filtrierung F* von einem Objekt (Ring) A ist eine Familie von $(F_iA)_{i\in\mathbb{Z}}$ von Unterobjekten (Unterring), so dass

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

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

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

Definition 0.9. [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 Körper 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 $\partial_x : k \to k$ der gewohnte Ableitungsoperator nach x, so gilt*

1. $[\partial_x, x] = \partial_x x - x\partial_x = 1$
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 [Sab90, 1.2.4.]

□

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:

$$[\frac{\partial}{\partial x}, f] = \frac{\partial f}{\partial x} \tag{1.4}$$

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

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

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

- $A_1(\mathbb{C}) := \mathbb{C}[x] < \partial_x >$ falls $k = \mathbb{C}[x]$, und nennen ihn die *Weyl Algebra*
- $\mathcal{D} := \mathbb{C}\{x\} < \partial_x >$ falls $k = \mathbb{C}\{x\}$
- $\widehat{\mathcal{D}} := \mathbb{C}[\![x]\!] < \partial_x >$ falls $k = \mathbb{C}[\![x]\!]$
- $\mathcal{D}_K := \mathbb{C}(\{x\}) < \partial_x >$ falls $k = K \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}\{x\}[x^{-1}]$
- $\mathcal{D}_{\widehat{K}} := \mathbb{C}(\!(x)\!) < \partial_x >$ 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 weiße eine Ringstruktur, dies ist in [AV09, Kapittel 2 Section 1] genauer ausgeführt.
- $\mathcal{D}_k$ ist 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] □

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

Kommentar: Gilt das folgende??

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

Kommentar: Besser?:
erst Filtrierung definieren und dadurch dann den Grad?

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

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

als den *Grad (oder den ∂_x-Grad)* von P.

Kommentar: Unabhängigkeit von Schreibung? Sabbah script!

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

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

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

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

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

□

Proposition 1.7. *Es gilt:*

$$gr^F\mathcal{D} \underbrace{:= \bigoplus_{N\in\mathbb{Z}} gr_N^F\mathcal{D} = \bigoplus_{N\in\mathbb{N}_0} gr_N^F\mathcal{D} \cong \bigoplus_{N\in\mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cong \mathbb{C}\{x\}[\xi] =}_{\substack{\cong \\ \textit{isomorph als grad. Ringe}}} \bigoplus_{N\in\mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\}\cdot\xi^N$$

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?

$\square$

1.1.1 Alternative Definition / Sichtweise

Kommentar: Nur abgeschrieben

[Kas03, Chap 1.1.] Sei X eine 1-Dimensionale complexe Mannigfaltigkeit und $\mathcal{O}_X$ die Garbe der holomorphen Funktionen auf X. Ein *(holomorpher) differenzial Operator* auf X ist ein Garben-Morphismus $P : \mathcal{O}_X \to \mathcal{O}_X$, 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 setzten $\partial_x^n u(x) = \frac{\partial^n u}{\partial x^n}(x)$. Wir sagen ein Operator hat höchstens Ordnung m, falls $\forall n \geq m : \alpha_n(x) \equiv 0$.

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 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*

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

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 $\mathcal{D} - mod(\mathbb{A}^1)$

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

Da $\mathcal{D}$ ein nichtkommutativer Ring ist, muss man vorsichtig sein und zwischen links unr rechts $\mathcal{D}$-Moduln unterschiden. 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 Hintergurnd, 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 $\mathcal{M} = \mathscr{O}_X \exp(\lambda x)$ 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 endich 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 $\operatorname{Car}\mathcal{M} \subset \{x = 0\} \cup \xi = 0$.

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 Carakteristische 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 $\mathfrak{a} \lhd \mathcal{D}$ 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 Carakteristische 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 andlichen Typ über $\mathbb{C}\{x\}$ ist, so ist $C[x^{-1}]$ 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 $P \in \mathcal{D}/\{0\}$*

Kommentar: *Formal??*

2 Meromorphe Zusammenhänge

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

2.1 Systeme von ODEs und Meromorphe Zusammenhänge

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

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

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

Kommentar: TODO: zeige, das 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 $\mathcal{D} \cdot P \lhd \mathcal{D}$ 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 $\partial : \mathcal{M}_K \to \mathcal{M}_K$, genannt *Derivation* oder *Zusammenhang*, welche für alle $f \in K$ und $u \in \mathcal{M}_K$ die *Leibnitzregel*

  $$\partial(fu) = f'u + f\partial u \tag{2.2}$$

  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 $\partial : \mathcal{M}_{\widehat{K}} \to \mathcal{M}_{\widehat{K}}$, 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 $\varphi : \mathcal{M} \to \mathcal{N}$ ist ein Morphismus von Meromorphen Zusammenhängen, falls sie $\varphi \circ \partial_\mathcal{M} = \varphi \circ \partial_\mathcal{N}$ erfüllt. In diesem Fall schreiben wir auch $\varphi : (\mathcal{M}_K, \partial_\mathcal{M}) \to (\mathcal{N}_K, \partial_\mathcal{N})$.

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

Kommentar:

Definition 2.4. Wir erhalten damit die Kategorie dier 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 $A(x) = (a_{ij}(x))_{i,j\in\{1,\dots,n\}} \in M(n\times n, K)$ 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

$$\partial(u) = \partial\Big(\sum_{i=1}^n u_i(x)e_i\Big) \overset{\substack{\boxed{??}\\ \downarrow}}{=} \sum_{i=1}^n \Big(u_i'(x) - \sum_{j=1}^n a_{ij}u_j(x)\Big)e_i\,.$$

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 Zusammanhang $(\mathcal{M}, \partial)$ ausgestattet mit einer K-Basis $\{e_i\}_{i\in\{1,\dots,n\}}$ von $\mathcal{M}$ zu einem ODE zugeordnet werden kann.

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

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

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

Satz 2.7. *[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 2.8. *[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 2.9. [Sab90, Proof of Theorem 5.4.7]

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

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 2.10 (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 $m, \partial_x m, \ldots, \partial_x^{d-1} m$ eine K-Basis von $\mathcal{M}_K$ ist.*

Beweis. [AV09, Satz 4.8] □

Korollar 2.11. *In der Situation von Lemma 2.10 gibt es ein $P \in \mathcal{D}_K$ mit ∂-Grad von P ist gleich d und $P \cdot m = 0$, in diesem Fall ist P ein Minimalpolynom zu $\mathcal{M}_K$, also gilt $\mathcal{M}_K = \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P$.*

Satz 2.12. *[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 2.13. *Sei $P = P_1 \cdot P_2$ mit $P_1, P_2 \in \mathcal{D}_K$ wie in Satz 2.12 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. Denn:

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

□

Lemma 2.14. *Sei $(\mathcal{M}_K, \partial)$ ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und φ ein Basisisomorphismus von K^r nach $\mathcal{M}_K$, also in der Situation*

$$\begin{tikzcd} \mathcal{M}_K \arrow[r, "\partial"] & \mathcal{M}_K \\ K^r \arrow[u, "\cong\varphi"] \arrow[r, "\varphi^{-1}\circ\partial\circ\varphi"] & K^r \arrow[u, "\varphi\cong"'] \end{tikzcd}$$

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

Beweis. TODO, (3. Treffen) □

Kommentar:

Lemma 2.15. *Sei $(\mathcal{M}_K, \partial)$ ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und $\varphi : \mathcal{M} \to \mathcal{N}$ ein Isomorphismus so ist $(\mathcal{N}, \varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi)$ ein zu $(\mathcal{M}_K, \partial)$ isomorpher Zusammenhang.*

$$\begin{tikzcd} \mathcal{M}_K \arrow[r, "\partial"] & \mathcal{M}_K \\ \mathcal{N} \arrow[u, "\cong\varphi"] \arrow[r, "\varphi^{-1}\circ\partial\circ\varphi"] & \mathcal{N} \arrow[u, "\varphi\cong"'] \end{tikzcd}$$

Beweis. TODO, (3. Treffen) □

Lemma 2.16. *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.

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

□

Korollar 2.17. *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 $\frac{d}{dx} - \partial : K^r \to K^r$ 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 2.18 (Transformationsformel)**.** *[HTT07, Chap 5.1.1] In der Situation*

$$\begin{tikzcd}
K^r \arrow[rrr, "\frac{d}{dz}+A"] \arrow[dr, "\varphi", "\cong"'] & & & K^r \arrow[dl, "\varphi"', "\cong"] \\
& M \arrow[r, "\partial"] & M & \\
K^r \arrow[uu, "\cong T"] \arrow[ur, "\psi"', "\cong"] \arrow[rrr, "\frac{d}{dz}+B"] & & & K^r \arrow[uu, "T\cong"'] \arrow[ul, "\psi", "\cong"']
\end{tikzcd}$$

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

[Sab90, Chap 5.2]

Lemma 2.20. *[Sab90, Lem 5.2.1.] Es existiert eine Basis von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ über $\widehat{K}$ mit der Eigenschaften, 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 $m, \partial_x m, \ldots, \partial_x^{d-1} m$ (siehe Lemma 2.10). 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: TODO: 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 $m, x\partial_x m, \ldots, (x\partial_x)^{d-1} m$ 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 2.21. *[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 □

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

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

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

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

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

Definition 2.22. Das Randpolygon der konvexen Hülle $\operatorname{conv}(H(P))$ von $H(P)$ heißt das *Newton Polygon* von P und wird als $N(P)$ geschrieben.

Bemerkung 2.23. Claude Sabbah definiert das Newton-Polygon in [Sab90, 5.1] auf eine andere Weiße. 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

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

Definition 2.24. Die Menge $\operatorname{slopes}(P)$ 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 singulär* $:\Leftrightarrow \operatorname{slopes}(P) = \{0\}$ oder $\deg P = 0$, sonst *irregulär singulär*.
- Ein meromorpher Zusammenhang $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ (bzw. $\mathcal{M}_K$) heißt regulär singulär, 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 2.25. 1. Ein besonders einfaches Beispiel ist $P_1 = x^1 \partial_x^2$. Es ist leicht abzulesen, dass

$$m = 2 \qquad\qquad l = 1$$

so dass

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

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

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.

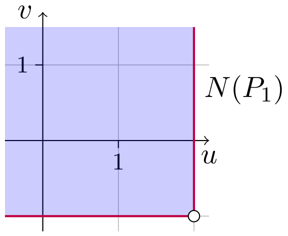


Abbildung 2.1: Newton-Polygon zu $P_1 = x\partial_x^2$

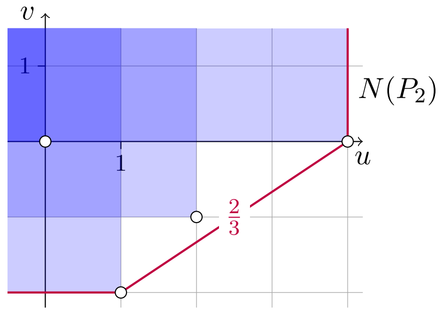


Abbildung 2.2: Newton-Polygon zu P_2

Bemerkung 2.26. [AV09, Bem 5.4] Für alle $f \in \mathcal{D}^{\times}_{\widehat{K}}$

Kommentar: $f \in \mathbb{C}(\{x\}) \setminus \{0\}$

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.

Beweis. TODO ☐

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

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

ist.

Definition 2.27. In einem Polynom $P = \varepsilon x^p \partial_x^q + \sum_{k=0}^{n} \left(\sum_{l=-N}^{\infty} \alpha_{kl} x^l\right) \partial_x^k$, 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 2.28.
- Anschaulich bedeutet das, dass

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

für alle relevanten k und l.

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

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

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

Kommentar:

Beispiel 2.29.

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

und somit gilt

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

Lemma 2.30. *[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 2.31. *[Sab90, 5.1]*

1. *$\mathcal{P}(\mathcal{M}_K)$ ist nicht Leer, wenn $\mathcal{M}_K \neq \{0\}$*
2. *Wenn man eine exacte Sequenz $0 \to \mathcal{M}'_K \to \mathcal{M}_K \to \mathcal{M}''_K \to 0$ 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 Exacte Sequenz

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

Korollar 2.32. *[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 2.33. *[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 exisitiert 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] □

Bemerkung 2.34. In Satz 2.33 ist es wirklich notwendig formale Meromorphe Zusammenhänge zu betrachten, denn das Resultat gilt nicht für konvergente Meromorphe Zusammenhänge.

Kommentar:

Beispiel 2.35. [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

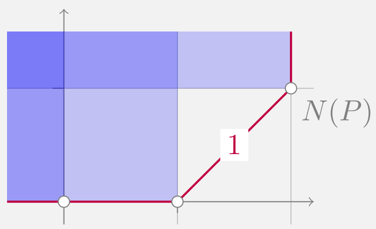


Abbildung 2.3: Newton Polygon zu $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$

mit den Slopes $\mathcal{P}(P) = \{0, 1\} =: \{\Lambda_1, \Lambda_2\}$. Nach dem Satz 2.33 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

$$P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$$

...

$$= (x(x\partial_x) + \dots) \cdot (x\partial_x + \dots)$$
$$\dots$$
$$= P_1 \cdot P_2$$

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

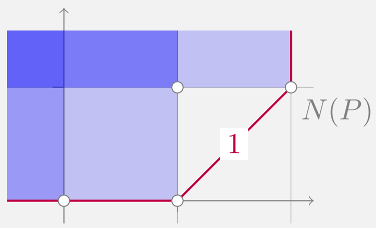


Abbildung 2.4: Newton Polygon zu P

Kommentar:

Korollar 2.36. *[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 gekürtzt, 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

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

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

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

Definition 2.37 (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

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

definieren.

Bemerkung 2.38. Man hat $\operatorname{ord}_\ell(PQ) = \operatorname{ord}_\ell(P) + \operatorname{ord}_\ell(Q)$ und falls $\lambda_0 \neq 0$ hat man auch, dass $\operatorname{ord}_\ell([P,Q]) \leq \operatorname{ord}_\ell(P) + \operatorname{ord}_\ell(Q) - 1$.

Definition 2.39 (ℓ-Symbol)**.** [Sab90, Seite 25] Falls $\lambda_0 \neq 0$ ist der graduierte Ring $gr^{\,{}^\ell V}\mathcal{D}_{\widehat{K}} \overset{\text{def}}{=} \bigoplus_{\lambda \in \mathbb{Z}} gr_\lambda^{\,{}^\ell V}\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ 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 $gr_{\operatorname{ord}_\ell(P)}^{\,{}^\ell V}\mathcal{D}_{\widehat{K}}$. σ_ℓ wir hierbei als das ℓ-Symbol Bezeichnet.

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

Bemerkung 2.40. Bei [Sab90] wird der Buchstabe L anstatt ℓ für Linearformen verweden, 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 2.41. 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

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

Beweis. □

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

Definition 2.42 (Stützfunktion)**.** Die Funktion

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

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

Bemerkung 2.43. Wenn $\ell(x_0, s_1)$ wie oben aus Λ entstanden ist, so gilt

$$\omega_P(\Lambda) = ord_\ell(P)\,.$$

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

2.4 Operationen auf Meromorphen Zusammenhängen

2.4.1 Tensorprodukt

Proposition 2.44. *[Sch, Prop 4.1.1] Seien $(\mathcal{M}, \partial_\mathcal{M})$ und $(\mathcal{N}, \partial_\mathcal{N})$ Meromorphe Zusammenhänge. Sei $n \otimes n \in \mathcal{M} \otimes_K \mathcal{N}$. Durch setzten von*

$$\partial_\otimes(m \otimes n) = \partial_\mathcal{M}(m) \otimes n + m \otimes \partial_\mathcal{N}(n) \tag{2.3}$$

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 2.45. *[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 □

2.4.2 pull-back und push-forward

Kommentar: Nach [Sab07, 1.a] und [HTT07, 1.3].

Es sei

$$\rho : \mathbb{C} \to \mathbb{C}, t \mapsto x := \rho(t) \qquad \in t\mathbb{C}[\![t]\!]$$

eine Polynomielle Abbildung mit Bewertung $p \geq 1$. Hier werden wir meistens $\rho(t) = t^p$ für ein $p \in \mathbb{N}$ betrachten. Diese Funktion induziert eine Abbildung

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

analog erhalten wir

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

wobei L (bzw. $\widehat{L}$) eine enldiche 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 2.46 (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

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

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

$$\partial_t(1 \otimes m) := \rho'(t) \otimes \partial_x m\,. \tag{2.4}$$

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

$$\partial_t(\varphi \otimes m) := \rho'(t)(\varphi \otimes \partial_x m) + \frac{\partial\varphi}{\partial t} \otimes m\,. \tag{2.5}$$

Kommentar: Nun wollen wir uns noch genauer mit dem pull-back beschäftigen, und stellen uns die Frage:

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

$$\begin{aligned}
\partial_x(f(x)m) &= \partial_{\rho(t)}(f(\rho(t))m) \\
&= f'(\rho(t)) \cdot \underbrace{\frac{\partial(f(t))}{\partial(f(t))}}_{=1} m + f(\rho(t)) \underbrace{\partial_{\rho(t)}}_{=\partial_x} m \\
&= f'(\rho(t))m + f(\rho(t))\partial_x m = (\star) \\
\rho'(t)^{-1}\partial_t(f(x)m) &= \frac{1}{pt^{p-1}}\partial_t(f(t^p)m) \\
&= f'(t^p)m + f(t^p)\frac{1}{pt^{p-1}}\partial_t m = (\star)
\end{aligned}$$

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

Satz 2.47. *In der Situation von Lemma 2.46, mit $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x)$ für ein $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$, gilt*

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

Für $P(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t)$ werden wir auch ρ^*Pschreiben.

Kommentar: [Cou95, Seite 130] Holonomic modules are preserved under this constructi-on.

Kommentar: [Sab90, Page 34] Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein formaler Meromorpher Zusammenhang. Man definiert $\pi^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ als den Vektor Raum über $\widehat{L}$: $\pi^*\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}$. 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 Satz 2.47 werden zunächst ein paar Lemmata bewiesen.

Lemma 2.48. *Es gilt* $\rho^*\mathcal{D}_{\widehat{K}} \overset{def}{=} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}}$ *als* $\mathcal{D}_{\widehat{L}}$*-Moduln, mittels*

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

Beweis. Prüfe zunächst die Injektivität. Sei $f(t) \otimes Q(x, \partial_x) \in \ker(\Phi)$ so, dass

$$\begin{aligned} 0 &= \Phi(f(t) \otimes Q(x, \partial_x)) \\ &= f(t)Q(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t) \end{aligned}$$

und, da hier alles Nullteilerfrei ist, ist die Bedingung äquivalent zur folgenden

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \qquad 0 = f(t) \qquad \text{oder} \qquad 0 = m(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t) \\ &\Leftrightarrow \ldots \end{aligned}$$

Kommentar: TODO

Nun zur Surjektivität. Sei $g(t, \partial_t) = \sum_k a_k(t)\partial_t^k \in \mathcal{D}_{\widehat{L}}$ so gilt

$$\begin{aligned} g(t, \partial_t) &= \sum_k a_k(t)\partial_t^k \\ &= \sum_k a_k(t)\underbrace{\rho'(t)\rho'(t)^{-1}}_{=1}\partial_t^k \\ &= \rho'(t)\sum_k a_k(t)\rho'(t)^{-1}\partial_t^k \\ &= \ldots \end{aligned}$$

Kommentar: TODO

□

Lemma 2.49. *Das in Lemma 2.48 definierte* Φ *ist sogar ein Morphismus von Meromorphen Zusammenhängen, also gilt sogar* $\rho^*\mathcal{D}_{\widehat{K}} \overset{def}{=} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}}$ *als Meromorphe Zusammenhänge.*

Beweis. Wir wollen noch zeigen, dass $\partial_t \circ \Phi = \Phi \circ \partial_\otimes$ gilt, also dass Φ ein Morphismus von Meromorphen Zusammenhängen ist. Betrachte dazu das Diagram

$$\begin{tikzcd}
\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\partial_\otimes"] \arrow[d, "\cong \Phi"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[d, "\cong \Phi"] \\
\mathcal{D}_{\widehat{L}} \arrow[r, "\partial_t"] & \mathcal{D}_{\widehat{L}}
\end{tikzcd}$$

und für einene Elementartensor $f(t) \otimes Q(x, \partial_x) \in \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ folgt dann

$$\begin{tikzcd}
f(t) \otimes Q(x, \partial_x) \arrow[r, mapsto, "\partial_\otimes"] \arrow[dd, mapsto, "\Phi"] & \partial_t f(t) \otimes Q(x, \partial_x) + \rho'(t) \otimes \partial_x Q(x, \partial_x) \arrow[d, mapsto, "\Phi"] \\
& \partial_t f(t) Q(x, \partial_x) + \underbrace{\rho'(t) \cdot \rho'(t)^{-1}}_{=1} \partial_t Q(\rho(t), \rho'(t)^{-q} \partial_t) \arrow[d, bend left, dash, "="] \\
f(t) Q(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \arrow[r, mapsto, "\partial_t"] & \partial_t f(t) Q(x, \partial_x) + \partial_t Q(\rho(t), \rho'(t)^{-q} \partial_t)
\end{tikzcd}$$

also kommutiert das Diagram. $\square$

Kommentar:

Bemerkung 2.50. BENÜTZT BEREITS DAS NÄCHSTE LEMMA...

Das soeben, in Lemma 2.48, definierte Φ erfüllt für Elementartensoren $1 \otimes m \in \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$

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

und somit (2.4) wie gewollt.

Lemma 2.51. *Sei $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_K$. In der Situation*

$$\begin{tikzcd} \widehat{L}\otimes_{\widehat{K}}\mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id}\otimes \_\cdot P(x,\partial_x)"] \arrow[d, "\cong\Phi"] & \widehat{L}\otimes_{\widehat{K}}\mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[d, "\cong\Phi"] \\ \mathcal{D}_{\widehat{L}} \arrow[r, "\alpha"] & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \end{tikzcd}$$

mit Φ wie in Lemma 2.48 macht $\alpha := \_\cdot P(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t)$ das Diagram kommutativ.

Beweis. Betrachte ein $f(t)\otimes Q(x,\partial_x)\in \widehat{L}\otimes_{\widehat{K}}\mathcal{D}_{\widehat{K}}$. So gilt

$$\begin{tikzcd} f(t)\otimes Q(x,\partial_x) \arrow[r, mapsto, "\mathrm{id}\otimes \_\cdot P(x,\partial_x)"] & f(t)\otimes Q(x,\partial_x)\cdot P(x,\partial_x) \arrow[d, mapsto, "\Phi"] \\ & f(t)Q(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t)\cdot P(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t) \end{tikzcd}$$

und

$$\begin{tikzcd} f(t)\otimes Q(x,\partial_x) \arrow[d, mapsto, "\Phi"] & \\ f(t)Q(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t) \arrow[r, mapsto, "\_\cdot P(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t)"] & f(t)Q(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t)\cdot P(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t) \end{tikzcd}$$

also kommutiert das Diagram mit $\alpha = \_\cdot P(\rho(t),\rho'(t)^{-1}\partial_t)$. $\square$

Beweis zu Satz 2.47. Sei $P\in\mathcal{D}_{\widehat{K}}$ und $\mathcal{M}_{\widehat{K}} := \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}}\cdot P$. Wir wollen zeigen, dass

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

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

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\_\cdot P"] & \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\pi_{\widehat{K}}"] & \mathcal{M}_{\widehat{K}} \arrow[r] & 0 \\ & u \arrow[r, mapsto] & u\cdot P & & \\ & & u \arrow[r, mapsto] & u \mod \mathcal{D}_{\widehat{K}}\cdot P & \end{tikzcd}$$

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

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id} \otimes \_ \cdot P"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \arrow[r] \arrow[d, equal] & 0 \\ & & & \rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} & \end{tikzcd}$$

exact.

Kommentar: Deshalb ist

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

Also mit Φ wie in Lemma 2.48 und $Q(t, \partial_t) := P(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t)$ nach Lemma 2.51 ergibt sich

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id} \otimes \_ \cdot P"] \arrow[d, "\cong \Phi"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r] \arrow[d, "\cong \Phi"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \arrow[r] & 0 \\ & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \arrow[r, "\_ \cdot Q"] & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & & \end{tikzcd}$$

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

$$\begin{tikzcd} 0 \arrow[r] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id} \otimes \_ \cdot P"] \arrow[d, "\cong \Phi"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \arrow[r, "\mathrm{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}"] \arrow[d, "\cong \Phi"] & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \arrow[r] & 0 \\ 0 \arrow[r] & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \arrow[r, "\_ \cdot Q"] & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \arrow[r, "\pi_{\widehat{L}}"] & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \Big/ \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q \arrow[r] & 0 \end{tikzcd}$$

und damit folgt, wegen Isomorphie der Cokerne, die Behauptung. □

Lemma 2.52. *[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 2.53 (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 $\mathrm{slopes}(P) = \{\frac{1}{2}\}$ (siehe Abbildung 2.5) und es ist 2 der Hauptnenner aller Slopes. Wende den pull-back mit $\rho : t \to x := t^2$ an. Zunächst ein paar Nebenrechnungen, damit wir Satz 2.47 einfacher anwenden können.

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

also ergibt einsetzen

$$\begin{aligned}
\rho^*P &= (t^2)^3(\frac{1}{4t^2}\partial_t^2 - \frac{1}{4t^3}\partial_t) - 4(t^2)^2\frac{1}{2t}\partial_t - 1 \\
&= \frac{1}{4}t^4\partial_t^2 \underbrace{-t^3\frac{1}{4}\partial_t - 4t^3\frac{1}{2}\partial_t} -1 \\
&= \frac{1}{4}t^4\partial_t^2 \overbrace{-2\frac{1}{4}}t^3\partial_t -1
\end{aligned}$$

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

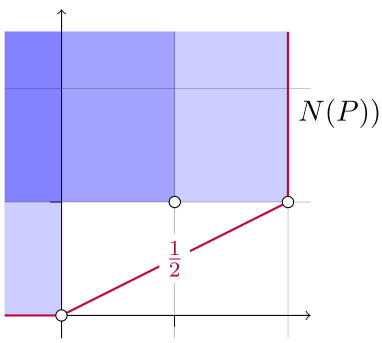


Abbildung 2.5: Newton Polygon zu $P = x^3\partial_x^2 - 4x^2\partial_x - 1$

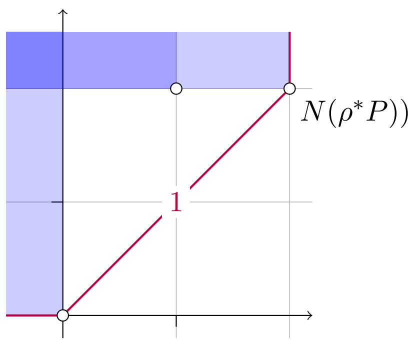


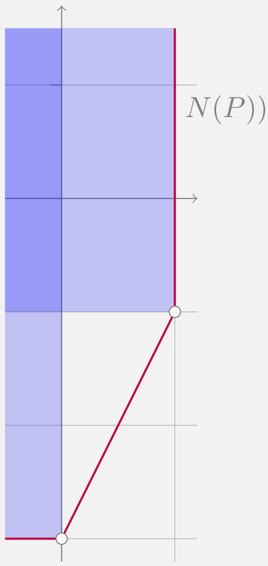
Abbildung 2.6: Newton Polygon zu $\rho^*P = \frac{1}{4}t^4\partial_t^2 - \frac{1}{2}t^3\partial_t - 1$

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

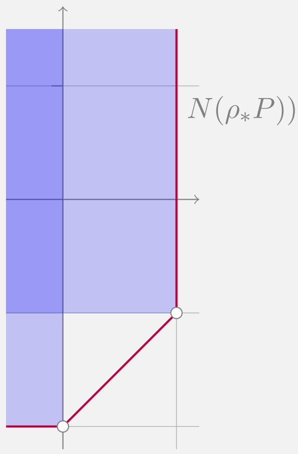
Definition 2.54 (push-forward)**.** [Sab07, 1.a] Der *push-forward* oder das *Direktes Bild* $\rho_+\mathcal{N}_{\widehat{L}}$ von $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$ ist

- 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 $\cdot : \begin{array}{ccc} \widehat{K} \times \mathcal{N}_{\widehat{L}} & \to & \mathcal{N}_{\widehat{L}} \\ (f(x), m) & \mapsto & f(x) \cdot m := f(\rho(t))m \end{array}$ und
- mit der Wirkung ∂_x beschrieben durch $\rho'(t)^{-1}\partial_t$.

Kommentar:



Newton-Polygon zu P



Newton-Polygon zu ρ_+P

Beispiel 2.55 (push-forward)**.** Für $\rho : t \to u^2$, $\varphi = \frac{1}{u^2}$ betrachte

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

mit slopes$(P) = \{2\}$ (siehe Abbildung 2.4.2). Bilde nun das Direkte Bild über ρ, betrachte dazu

$$\begin{aligned} \partial_u + \frac{2}{u^3} &= 2u(\frac{1}{2u}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \\ &= 2u(\rho'(u)^{-1}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \end{aligned}$$

$$= 2u(\partial_t + \frac{1}{t^2})$$

Also ist $\rho_+\mathscr{E}^{\varphi} \cong \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot (\partial_t + \frac{1}{t^2})$ mit $\rho_+P = \partial_t + \frac{1}{t^2}$ und $\mathrm{slopes}(\rho_+P) = \{1\}$ (siehe Abbildung 2.4.2)

Satz 2.56. *[Sab07, 1.a] Es gilt die Projektionsformel*

$$\rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \rho^+\mathcal{M}_{\widehat{K}}) \cong \rho_+\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}\,. \tag{2.6}$$

Beweis.

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

□

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

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

2.4.3 Fouriertransformation

Definition 2.57 (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 2.58 (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 2.59. Sei $P = x^3\partial_x^4 + x^2\partial_x^2 + x$ dann ist die Fouriertransformierte davon

$$
\begin{aligned}
\mathcal{F}_P &= \partial_z^3(-z)^4 + \partial_z^2(-z)^2 + \partial_z \\
&= \partial_z^2 z^2 + \partial_z^3 z^4 + \partial_z \\
&= z^4\partial_z^3 + [\partial_z^3, z^4] + z^2\partial_z^2 + [\partial_z^2, z^2] + \partial_z \\
&= z^4\partial_z^3 + \sum_{i=1}^{3} \frac{4 \cdot 3 \ldots (5-i) \cdot 3 \cdot 2 \ldots (4-i)}{i!} z^{4-i}\partial_z^{3-i} + z^2\partial_z^2 \\
&\quad + \sum_{i=1}^{2} \frac{2 \cdot 1 \ldots (3-i) \cdot 2 \cdot 1 \ldots (3-i)}{i!} z^{2-i}\partial_z^{2-i} + \partial_z \\
&= z^4\partial_z^3 + 12z^3\partial_z^2 + \frac{72}{2} z^2\partial_z + \frac{144}{6} z + z^2\partial_z^2 + 4z\partial_z + \frac{4}{2} + \partial_z \\
&= z^4\partial_z^3 + (12z^3 + z^2)\partial_z^2 + (36z^2 + 4z + 1)\partial_z + 24z + 2
\end{aligned}
$$

mit den Newton Polygonen wie in Abbildung 2.7 und 2.8.

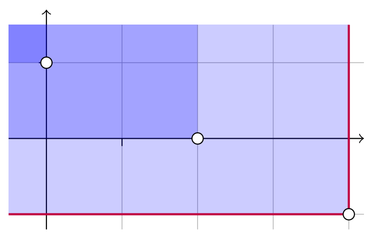


Abbildung 2.7: Newton-Polygon zu P

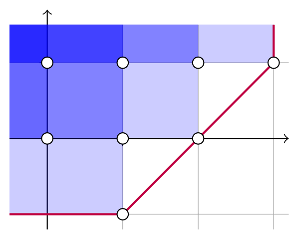


Abbildung 2.8: Newton-Polygon zu $\mathcal{F}_P$

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 $\mathscr{E}^{\varphi}_{\widehat{K}}$ 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 $f(x) \in \mathscr{E}^{\varphi}_{\widehat{K}}$ 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 $\mathscr{E}^{\varphi} \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\partial_x - \varphi'(x))$, weil für den zyklischen Vektor 1 gilt, dass $\partial_x \cdot 1 = \varphi'(x) \cdot 1$.

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

Kommentar:

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

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

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

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

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

$$\begin{tikzcd}
\rho^+\rho_+\mathscr{E}^{\varphi(u)} \arrow[r, "\cong"'] \arrow[d, "\partial_t"] & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_\xi} \arrow[d, "\partial_t"] \\
\rho^+\rho_+\mathscr{E}^{\varphi(u)} \arrow[r, "\cong"'] & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_\xi}
\end{tikzcd}$$

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

$$\partial_x t^k \boldsymbol{e} = \rho'(t)^{-1}\, \partial_t t^k\, \boldsymbol{e} = \rho'(t)^{-1}\, (t^k\partial_t + kt^{k-1})\, \boldsymbol{e}\,. \tag{3.1}$$

Durch die Setzung $\boldsymbol{e}_k := t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e}$ wird die Familie $\mathbf{e} := (\boldsymbol{e}_0, ..., \boldsymbol{e}_{p-1})$ eine $\widehat{L}$-Basis von $\rho^+\rho_+\mathscr{E}^\varphi$.

Zerlege nun

$$t\varphi'(t) = \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) \qquad \in t^{-2}\mathbb{C}[t^{-1}] \tag{3.2}$$

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). Damit gilt:

$$t\partial_t \boldsymbol{e}_k = \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i\psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i\psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+i-p}$$

denn:

$$\begin{aligned}
t\partial_t \boldsymbol{e}_k &= t\,\partial_t(t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e}) \\
&\overset{(2.3)}{=} t\,(-kt^{-k-1} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e} + pt^{p-1}\cdot t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} \partial_x(\underbrace{t^k\boldsymbol{e}}_{\in\rho_+\mathscr{E}^\varphi})) \\
&\overset{(3.1)}{=} -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e} + pt^{p-1}t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (pt^{p-1})^{-1}(kt^{k-1}\boldsymbol{e} + t^k\varphi'(t)\boldsymbol{e}) \\
&= -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e} + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (kt^{k-1}\boldsymbol{e} + t^k\varphi'(t)\boldsymbol{e}) \\
&= \underbrace{-kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\boldsymbol{e} + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} kt^{k-1}\boldsymbol{e}}_{=0} + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} t^k\varphi'(t)\boldsymbol{e} \\
&= t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k\, t\varphi'(t)\,\boldsymbol{e} \\
&\overset{(3.2)}{=} t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k \sum_{i=0}^{p-1} t^i\psi_i(t^p)\,\boldsymbol{e} \\
&= \sum_{i=0}^{p-1} \psi_i(t^p)(t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k t^i\boldsymbol{e})
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= \sum_{i=0}^{p-1} t^i \psi_i(t^p)(t^{-k-i} \otimes_{\widehat{K}} t^{k+i}\boldsymbol{e}) \\
&= \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+i} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+i-p}
\end{aligned}
$$

Sei

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

so dass $\mathbf{e} \cdot V = (\boldsymbol{e}_1, ..., \boldsymbol{e}_{p-1}, \boldsymbol{e}_0)$ gilt. Es gilt:

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

denn:

$$
\begin{aligned}
t\partial_t \mathbf{e} &= (t\partial_t \boldsymbol{e}_0, ..., t\partial_t \boldsymbol{e}_{p-1}) \\
&= \left(\sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p)\boldsymbol{e}_{k+i-p} \right)_{k\in\{0,..,p-1\}} \\
&= \mathbf{e} \begin{pmatrix}
u^{p-1}\psi_{p-1}(t^p) & & \cdots & t^3\psi_3(t^p) & t^2\psi_2(t^p) & t^1\psi_1(t^p) \\
t^1\psi_1(t^p) & t^{p-1}\psi_{p-1}(t^p) & & & \ddots & t^2\psi_2(t^p) \\
t^2\psi_2(t^p) & t^1\psi_1(t^p) & \ddots & & & t^3\psi_3(t^p) \\
t^3\psi_3(t^p) & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\
\vdots & & \ddots & t^1\psi_1(t^p) & t^{p-1}\psi_{p-1}(t^p) & \\
t^{p-2}\psi_{p-2}(t^p) & \cdots & t^3\psi_3(t^p) & t^2\psi_2(t^p) & t^1\psi_1(t^p) & t^{p-1}\psi_{p-1}(t^p)
\end{pmatrix} \\
&= \mathbf{e} \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) V^j \right]
\end{aligned}
$$

Die Wirkung von ∂_t auf die Basis $\mathbf{e}$ von $\rho^+\rho_+\mathscr{E}^{\varphi(t)}$ 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 Ähnlichkeitstransformation mit T auf die Form

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

mit $\xi^p = 1$, bringen. Sei so ein ξ ab jetzt Fixiert. So dass gilt:

$$
\begin{aligned}
T\left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)V^j\right]T^{-1} &= \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)(TVT^{-1})^j\right]\\
&= \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)D^j\right]\\
&= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p) & & & \\ & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)\left(\xi^1\right)^j & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)\left(\xi^{p-1}\right)^j \end{pmatrix}\\
&= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p) & & & \\ & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^1)^{j-1}\psi_j(t^p)\xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^{p-1})^{j-1}\psi_j(t^p)\xi^{p-1} \end{pmatrix}\\
&= \begin{pmatrix} \varphi'(t) & & & \\ & \varphi'(\xi t)\xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \varphi'(\xi^{p-1}t)\xi^{p-1} \end{pmatrix}\\
&= \begin{pmatrix} pt^{p-1} & & & \\ & p(\xi t)^{p-1}\xi & & \\ & & \ddots & \\ & & & p(\xi^{p-1}t)^{p-1}\xi^{p-1} \end{pmatrix}
\end{aligned}
$$

da $\varphi'(t) = pt^{p-1}$. Damit wissen wir bereits, das im Diagram

$$
\begin{tikzcd}
\rho^+\rho_+\mathscr{E}^{\varphi(u)} \arrow[d, "\partial_t"] & \widehat{L}^p \arrow[l, "\cong"'] \arrow[d, "\boxed{\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)V^j}"] & \widehat{L}^p \arrow[l, "T", "\cong"'] \arrow[r, "\Phi", "\cong"'] \arrow[d, "\boxed{\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)D^j}"] & \bigoplus_{i=0}^{p-1}\mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_{\xi^i}} \arrow[d, "\partial_t"] \\
\rho^+\rho_+\mathscr{E}^{\varphi(u)} & \widehat{L}^p \arrow[l, "\cong"'] & \widehat{L}^p \arrow[l, "T", "\cong"'] \arrow[r, "\Phi", "\cong"'] & \bigoplus_{i=0}^{p-1}\mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_{\xi^i}}
\end{tikzcd}
$$

$(\star)$

der mit $(\star)$ bezeichnete Teil kommutiert, wobei $\Phi : (0,\dots,0,\overset{\boxed{\text{k-te Stelle}}}{\overset{\downarrow}{1}},0,\dots,0) \mapsto e_k$ der kanonische Basisisomorphismus und e_k basis von $\mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_{\xi^{k-1}}}$. Um zu zeigen, dass das vollständige Diagram kommutiert, zeigen wir noch, dass

$$\partial_t(v) = \Phi(\Phi^{-1}(v) \cdot \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)D^j\right]) \qquad\qquad \forall v \in \bigoplus_{i=0}^{p-1} \mathscr{E}^{\varphi\circ\mu_{\xi^i}}$$

gilt. Es reicht zu zeigen, dass die Aussage für alle Basiselemente e_k gilt. Nach Definition 3.1 gilt

$$\begin{aligned}
\partial_t e_k &= \underbrace{(\varphi \circ \mu_{\xi^{k-1}})'(t)}_{\boxed{\text{Kettenregel}}\ \downarrow}\, e_k \\
&= \overbrace{\underbrace{\varphi(\mu'_{\xi^{k-1}})}\cdot\underbrace{\varphi'(t)}}\, e_k \\
&= \overbrace{(\xi^{k-1})^p}\cdot\overbrace{(pt^{p-1})}\, e_k \\
&= p(\xi^{k-1}t)^{p-1}\xi^{k-1}e_k
\end{aligned}$$

und auf dem anderem Weg gilt:

$$\begin{tikzcd}
\Phi^{-1}(e_k) = (\dots,0,1,0,\dots) \arrow[d, mapsto, "\boxed{\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1}\psi_j(t^p)D^j}"] & & e_k \arrow[ll, mapsto, "\Phi^{-1}"'] \\
(\dots,0,p(\xi^{k-1}t)^{p-1},0,\dots) \arrow[rr, mapsto, "\Phi"] & & \varphi'(\xi^{k-1}t)\xi^{k-1}e_k
\end{tikzcd}$$

Also kommutiert das Diagram und damit ist die Aussage gezeigt. $\square$

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

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

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

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

Beweis. Siehe [Hei10, Lem 5.12] □

Kommentar:

3.1 Defnintion in [Sab07]

Definition 3.8 (Elementarer formaler Zusammenhang)**.** [Sab07, Def 2.1] Zu einem gegebenen $\rho \in t\mathbb{C}[\![t]\!]$, $\varphi \in \widehat{L} \overset{\text{def}}{=} \mathbb{C}(\!(t)\!)$ und einem endlich dimensionalen $\widehat{L}$-Vektorraum R mit regulärem Zusammenhang ∇, definieren wir den assoziierten Elementaren endlich dimensionalen $\widehat{K}$-Vektorraum mit Zusammenhang, durch:

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

[Sab07, nach Def 2.1] Bis auf Isomorphismus hängt $El(\rho, \varphi, R)$ nur von $\varphi \mod \mathbb{C}[\![t]\!]$ 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 $\psi \circ \mu_\zeta \equiv \varphi \mod \mathbb{C}[\![t]\!]$*
- *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 $\rho_+(\mathscr{E}^{\varphi} \otimes L)$, wobei $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$, $\rho : t \to t^p$ vom Grad $p \geq 1$ und ist minimal unter φ. (siehe [Sab07, Rem 2.8]) und L ist ein Rang 1 $\widehat{L}$-Vektrorraum 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 $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x)$ und sei $\varphi \in \widehat{K}$. So gilt*

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

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

Beweis. TODO □

Korollar 3.13. *Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ und φ wie in 3.12, so gilt*

$$\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{\varphi} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{-\varphi} = \mathcal{M}_{\widehat{K}}.$$

Beweis. Denn

$$\begin{aligned}
\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{\varphi} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{-\varphi} &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x) \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{\varphi} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{-\varphi} \\
&= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x - \frac{\partial \varphi}{\partial x}) \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{-\varphi} \\
&= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x \underbrace{- \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial(-\varphi)}{\partial x}}_{=0}) \\
&= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x) = \mathcal{M}_{\widehat{K}}
\end{aligned}$$

□

Lemma 3.14. *Sei $\mathcal{M} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$ ein Meromorpher Zusammenhang mit P von Grad q und mit $\boldsymbol{e}$ als ein zyklischer Vektor, so ist $\boldsymbol{e} \otimes \underbrace{1}_{\in \widehat{K}}$ ein zyklischer Vektor für $\mathcal{N} := \mathcal{M} \otimes_{\widehat{K}} \mathscr{E}^{\psi}_{\widehat{K}}$.*

Beweis. Da der Grad von P gleich q ist, ist nach Lemma 3.12 auch Q von grad q und somit $\dim_{\widehat{K}} \mathcal{N} = q$. Also reicht zu zeigen, dass $\boldsymbol{e} \otimes 1$, $\partial_x(\boldsymbol{e} \otimes 1)$, $\partial_x^2(\boldsymbol{e} \otimes 1)$,..., $\partial_x^{q-1}(\boldsymbol{e} \otimes 1)$ ein linear unabhängiges System ist. Es gilt

$$\begin{aligned}
\partial_x(\boldsymbol{e} \otimes 1) &= (\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + x \otimes \partial_x 1 \\
&= (\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \boldsymbol{e} \otimes \psi'(x) \\
&= (\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi'(x)(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\
\partial_x^2(\boldsymbol{e} \otimes 1) &= \partial_x((\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi'(x)(\boldsymbol{e} \otimes 1))
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= (\partial_x^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1 + (\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes \psi'(x) + \psi''(x)(\boldsymbol{e} \otimes 1) + \psi'(x)((\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \boldsymbol{e} \otimes \psi'(x)) \\
&= (\partial_x^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi'(x)(\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi''(x)(\boldsymbol{e} \otimes 1) + \psi'(x)(\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi'(x)^2(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\
&= (\partial_x^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1 + 2\psi'(x)(\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + (\psi''(x) + \psi'(x)^2)(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\
&\vdots \\
\partial_x^{q-1}(\boldsymbol{e} \otimes 1) &= (\partial_x^{q-1} \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \lambda_{q-2}(\partial_x^{q-2} \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \cdots + \lambda_1(\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \lambda_0(\boldsymbol{e} \otimes 1)
\end{aligned}
$$

und somit ist dann

$$
\begin{pmatrix} \boldsymbol{e} \otimes 1 \\ \partial_x(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\ \partial_x^2(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\ \vdots \\ \partial_x^{q-2}(\boldsymbol{e} \otimes 1) \\ \partial_x^{q-1}(\boldsymbol{e} \otimes 1) \end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\
\psi'(x) & 1 & 0 & & & \vdots \\
\star & \star & 1 & 0 & & \vdots \\
\vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
\star & \cdots & \cdots & \star & 1 & 0 \\
\lambda_0 & \lambda_1 & \cdots & \cdots & \lambda_{q-2} & 1
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} \boldsymbol{e} \otimes 1 \\ (\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1 \\ (\partial_x^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1 \\ \vdots \\ (\partial_x^{q-2} \boldsymbol{e}) \otimes 1 \\ (\partial_x^{q-1} \boldsymbol{e}) \otimes 1 \end{pmatrix}
$$

Da bekanntlich $\boldsymbol{e} \otimes 1$, $(\partial_x \boldsymbol{e}) \otimes 1$, $(\partial_x^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1, \ldots$, $(\partial_x^{q-1} \boldsymbol{e}) \otimes 1$ linear unabhängig sind, gilt dies auch für $\boldsymbol{e} \otimes 1$, $\partial_x(\boldsymbol{e} \otimes 1)$, $\partial_x^2(\boldsymbol{e} \otimes 1), \ldots$, $\partial_x^{q-1}(\boldsymbol{e} \otimes 1)$. Damit folgt die Behauptung. □

4 Levelt-Turrittin-Theorem

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

Kommentar:

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 2.33 in Meromorphe Zusammenhänge mit je einem Slope und wende jeweils die Induktion an. Mit $\Lambda =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ (vollständig gekürtzt) 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 $\mathrm{ord}_L(P) = 0$ because P is chosen with coefficients in $\mathbb{C}[\![x]\!]$, one of them, being a unit.

Schreibe

$$\begin{aligned}\sigma_L(P) &= \sum_{L(i,i-j)=\mathrm{ord}_L(P)} \alpha_{ij} x^j \xi^i \\ &= \sum_{L(i,i-j)=0} \alpha_{ij} x^j \xi^i \,.\end{aligned}$$

Sei $\theta := x^{\lambda_0+\lambda_1} xi^{\lambda_1}$ 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 $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes \mathcal{F}^R_{\widehat{K}}$.

Kommentar: AB HIER VLT NICHT RICHTIG, nur versuch

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

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

und hier haben wir

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

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 2.52 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.

□

Kommentar:

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 $\rho_+(\mathscr{E}^\varphi \otimes_{\widehat{K}} S)$, wobei $\varphi \in x^{-1}\mathbb{C}[x^-1]$, $\rho : x \mapsto t = x^p$ mit 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 eindutiger weiße geschrieben werden als direkte Summe $\bigoplus El(\rho, \varphi, R) \overset{def}{=} \bigoplus \rho_+(\mathscr{E}^\varphi) \otimes R$, so dass jedes $\rho_+\mathscr{E}^\varphi$ irreduzibel ist und keine zwei $\rho_+\mathscr{E}^\varphi$ isomorph sind.*

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 $\varphi \in \{\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k} | I \subset \mathbb{N} \text{ endlich}, a_k \in \mathbb{C}\}$ aus
2. und beginne mit $\mathscr{E}^\varphi$. Es gilt

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

> **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 $\mathscr{E}^\varphi$ und erhalte

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

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

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 $\partial_x \rightsquigarrow -z^2\partial_z$, und somit

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

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

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

$$P_\varphi(x, \partial_x) = (-x^2\partial_x)^{\max(I)}(x\partial_x - 1) + \sum_{k\in I} ka_k(-x^2\partial_x)^{\max(I)-k} \qquad \in \mathbb{C}[x] < \partial_x >$$

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

$$\begin{aligned}
Q(t, \partial_t) &= t^{\max(I)+1}(\partial_t - \frac{d}{dt}\varphi(t)) \\
&= t^{\max(I)+1}\Big(\partial_t + \sum_{k\in I} k\frac{a_k}{t^{k+1}}\Big) \\
&= t^{\max(I)+1}\partial_t + \sum_{k\in I} ka_k t^{\max(I)-k} && \in \mathbb{C}[t] < \partial_t > \\
\mathcal{F}_Q(z, \partial_z) &= Q(\partial_z, -z) \\
&= -\partial_z^{\max(I)+1} z + \sum_{k\in I} ka_k \partial_z^{\max(I)-k}
\end{aligned}$$

und damit ist

$$\begin{aligned}
P_\varphi(x, \partial_x) &= \mathcal{F}_Q(x^{-1}, -x^2\partial_x) \\
&= -(-x^2\partial_x)^{\max(I)+1}x^{-1} + \sum_{k\in I} ka_k(-x^2\partial_x)^{\max(I)-k} \\
&= (-x^2\partial_x)^{\max(I)}x^2\,\partial_x x^{-1} + \sum_{k\in I} ka_k(-x^2\partial_x)^{\max(I)-k} \\
&= (-x^2\partial_x)^{\max(I)}\,x^2\,(x^{-1}\partial_x - x^{-2}) + \sum_{k\in I} ka_k(-x^2\partial_x)^{\max(I)-k}
\end{aligned}$$

$$= (-x^2\partial_x)^{\max(I)}(x\partial_x - 1) + \sum_{k\in I} k a_k(-x^2\partial_x)^{\max(I)-k} \qquad \in \mathbb{C}[x] < \partial_x >$$

□

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

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

Kommentar: Allgemeiner? für allgemeine 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 nicht von bedeutung sind und deshalb vernachlässigt werden können. Betrachte dazu die Konvexen Hüllen, die wie in Abschnitt 2.3 konstruiert werden. Sei $q := \max(I)$.

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

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

Behauptung: Es gilt

$$H\Big(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + q a_q + \sum_{k\in I\setminus\{q\}} k a_k(-x^2\partial_x)^{q-k}\Big) \subset H\Big(x^{2q+1}\partial_x^{q+1} + q a_q\Big)$$

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

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

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

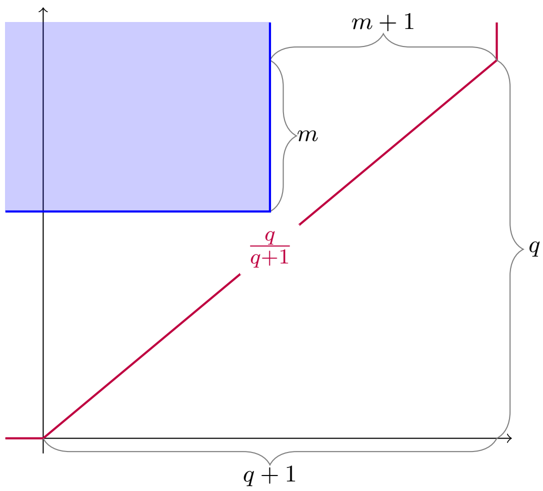


Abbildung 5.1: Newton-Polygon zu P_φ mit $H(x^{2(q-m)}\partial_x^{q-m})$

Mit der Behauptung gilt dann, dass

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

Also ist

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

womit die Behauptung des Lemmas folgt und das Newton-Polygon wie in Abbildung 5.1 aussieht. □

Kommentar:

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

Also ist, nach Lemma 2.52, ein pull-back mit Grad $q+1$ hinreichend, um einen ganzzahligen Slope zu bekommen. Denn wir wissen, dass nach Anwenden eines solchem pull-backs die Slopes mit $q+1$ multipliziert werden, also gilt $\mathcal{P}(\rho^+\mathcal{M}_\varphi) = \{q\} \subset \mathbb{N}$.

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

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

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

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

und sei $\rho : t \mapsto x := -(q+1)t^{q+1}$. Damit gilt

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

□

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

$$\ell(s_0, s_1) = \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1 = qs_0 + s_1\,.$$

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, das $ord_\ell = 0$?

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

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

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

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 $\mathrm{ord}_\ell(\rho^* P_\varphi) = 0$ 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

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

Kommentar:

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

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

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

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

und somit ist dann

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

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

Kommentar:

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

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

Zerlege nun wie in Satz 2.33 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 $\mathscr{E}_{\widehat{L}}^{-\psi}$ und somit ist dann

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

Für jeden Summanden lässt sich nun, falls dieser nicht schon ein Elementarer Meromorpher Zusammenhang ist, Induktion anwenden.

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

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

$$\begin{aligned}
P_\varphi(x, \partial_x) &= -x^2\partial_x(x\partial_x - 1) + a \\
&= -x^2\, \partial_x x\, \partial_x + x^2\partial_x + a \\
&= -x^2\, (x\partial_x + 1)\, \partial_x + x^2\partial_x + a \\
&= -x^3\partial_x^2 \underbrace{- x^2\partial_x + x^2\partial_x}_{=0} + a \\
&= -x^3\partial_x^2 + a
\end{aligned}$$

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

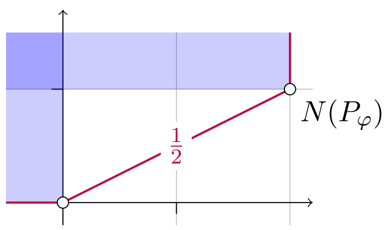


Abbildung 5.2: Newton Polygon zu P_φ

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

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

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 $1 = \frac{1}{1} =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$.

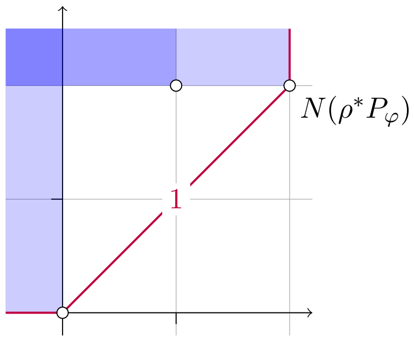


Abbildung 5.3: Newton Polygon zu $\rho^* P_\varphi$

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

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

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

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

mit den Nullstellen $i\sqrt{2a} =: \beta$ und $-i\sqrt{2a}$. Setze $\psi(x) := (\beta/\lambda_0) t^{-\lambda_0} = i\sqrt{2a} t^{-1}$ und betrachte den Twist $\mathcal{N} := \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes \mathscr{E}^\psi$ von $\rho^+ \mathcal{M}$. Es ist $\boldsymbol{e} \otimes 1$ ein zyklischer Vektor, wobei $\boldsymbol{e}$ ein zyklischer Vektor von $\rho^+ \mathcal{M}$ ist. Mit dem Lemma vom Zyklischem Vektor wollen wir nun ein Minimalpolynom zu $\mathcal{N}$ berechnen:

$$\begin{aligned}
\partial_t^2 (\boldsymbol{e} \otimes 1) &= \partial_t (\partial_t (\boldsymbol{e} \otimes 1)) \\
&\overset{(2.3)}{=} \partial_t ((\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \boldsymbol{e} \otimes \psi'(t)) \\
&\overset{(2.3)}{=} (\partial_t^2 \boldsymbol{e}) \otimes 1 + (\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes \psi'(t) + (\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes \psi'(t) + \boldsymbol{e} \otimes \underbrace{(\psi''(t) + \psi'(t)^2)}_{\in K} \\
&= ((t^{-1} \partial_t - 2a t^{-4}) \boldsymbol{e}) \otimes 1 + 2\psi'(t)(\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes 1 + (\psi''(t) + \psi'(t)^2) \boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&= (t^{-1} \partial_t \boldsymbol{e}) \otimes 1 - 2a t^{-4} \boldsymbol{e} \otimes 1 + 2\psi'(t)(\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes 1 + \psi''(t) \boldsymbol{e} \otimes 1 + \psi'(t)^2 \boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&= (t^{-1} + 2\psi'(t)) (\partial_t \boldsymbol{e}) \otimes 1 + (-2a t^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2) \boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&\overset{(2.3)}{=} (t^{-1} + 2\psi'(t)) (\partial_t (\boldsymbol{e} \otimes 1) - \boldsymbol{e} \otimes \psi'(t)) + (-2a t^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2) \boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \partial_t (\boldsymbol{e} \otimes 1) - (\psi'(t) t^{-1} + 2\psi'(t)^2) \boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&\qquad + (-2a t^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2) \boldsymbol{e} \otimes 1
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&= \Big((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2\psi'(t)^2 - 2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2\Big)\boldsymbol{e} \otimes 1 \\
&= \Big((t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t - \psi'(t)t^{-1} - 2at^{-4} + \psi''(t) - \psi'(t)^2\Big)\boldsymbol{e} \otimes 1
\end{aligned}
$$

also

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

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

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

mit, wie gewünscht, mehr als einem Slope.

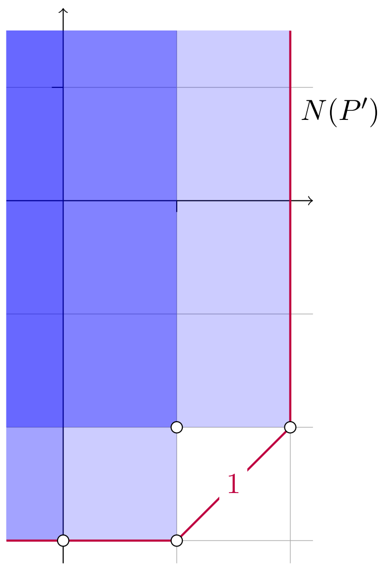


Abbildung 5.4: Newton Polygon zu $\mathcal{N}$

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

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

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

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

Unser nächstes Ziel ist es, $\mathcal{N} = \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P'$ 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 5.7. Ist Q_1 und Q_2 so ein solches Paar, dann ist für $\sigma \in \widehat{L}$ das Paar $\bar{Q}_1 := Q_1 \cdot \sigma^{-1}$ und $\bar{Q}_2 := \sigma \cdot Q_2$ ebenfalls eine Zerlegung, denn

$$P' = Q_1 \cdot Q_2 = Q_1 \cdot \underbrace{\sigma^{-1} \cdot \sigma}_{=1} \cdot Q_2 = \bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_2\,.$$

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

$$Q_1 := \bar{v}(t)\partial_t + v(t) \qquad Q_2 := \partial_t + u(t) \qquad \text{mit } \bar{v}(t), v(t), u(t) \in \widehat{L}$$

und somit ist ist das Produkt gegeben durch

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

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 $u_{-2} \neq 0$.

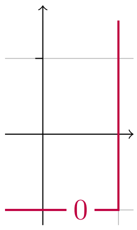


Abbildung 5.5: Newton-Polygon zu Q_1

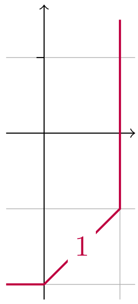


Abbildung 5.6: Newton-Polygon zu Q_2

Mit diesen Informationen erhalten wir aus (5.1) die Gleichung

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

und mit denn Kommutatorregeln gilt

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

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

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

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

$$
\begin{aligned}
\Big(\sum_{n=-1}^{\infty} v_n t^n\Big)\Big(\sum_{n=-2}^{\infty} u_n t^n\Big) &\overset{\overset{\boxed{\text{Indexshift}}}{\downarrow}}{=} t^{-3}\Big(\sum_{n=0}^{\infty} v_{n-1} t^n\Big)\Big(\sum_{n=0}^{\infty} u_{n-2} t^n\Big) \\
&\overset{\overset{\boxed{\text{Cauchy Produkt}}}{\downarrow}}{=} t^{-3}\sum_{n=0}^{\infty}\Big(\sum_{k=0}^{n} v_{k-1} t^k u_{n-k-2} t^{(n-k)}\Big) \\
&= \sum_{n=0}^{\infty}\Big(\sum_{k=0}^{n} v_{k-1} u_{n-k-2} t^{k+(n-k)-3}\Big) \\
&= \sum_{n=0}^{\infty}\Big(\sum_{k=0}^{n} v_{k-1} u_{n-k-2}\Big) t^{n-3} \\
&\overset{\overset{\boxed{\text{Indexshift}}}{\downarrow}}{=} \sum_{n=-3}^{\infty}\Big(\sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1} u_{n-k+1}\Big) t^n
\end{aligned}
$$

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

$$
\begin{aligned}
Q_1 \cdot Q_2 &= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty}(u_n + v_n)t^n \partial_t + \sum_{n=-3}^{\infty}(n+1)u_{n+1}t^n + \sum_{n=-3}^{\infty}\Big(\sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1}u_{n-k+1}\Big)t^n \\
&= \partial_t^2 + \sum_{n=-2}^{\infty}(u_n + v_n)t^n \partial_t + \sum_{n=-3}^{\infty}\Big((n+1)u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1}u_{n-k+1}\Big)t^n \\
&\overset{!}{=} \partial_t^2 - (t^{-1} - 2i\sqrt{2a}t^{-2})\partial_t - 3i\sqrt{2a}t^{-3}
\end{aligned}
$$

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

$$
2i\sqrt{2a}t^{-2} - t^{-1} = \sum_{n=-2}^{\infty}(u_n + v_n)t^n \tag{5.4}
$$

$$
-3i\sqrt{2a}t^{-3} = \sum_{n=-3}^{\infty}\Big((n+1)u_{n+1} + \sum_{k=0}^{n+3} v_{k-1}u_{n-k+1}\Big)t^n \tag{5.5}
$$

Nun können wir mit (5.4) und (5.5) jeweils nochmals einen Koeffizientenvergleich machen und erhalten zunächst aus (5.4), dass

$$
2i\sqrt{2a} = u_{-2} + \underbrace{v_{-2}}_{=0} = u_{-2} \tag{5.6}
$$

$$
-1 = u_{-1} + v_{-1} \tag{5.7}
$$

$$0 = u_n + v_n \qquad \forall n \geq 0 \tag{5.8}$$

Als nächstes wollen wir dieses Ergenis mit (5.5) kombinieren. Betrachte zunächst die Vorfaktoren vor t^{-3}:

$$\begin{aligned}
-3i\sqrt{2a} &= (-2)u_{-2} + \sum_{k=0}^{0} v_{k-1}u_{-3-k+1} \\
&= -2u_{-2} + v_{-1}u_{-2} \\
&\overset{(5.6)}{=} -2 \cdot 2i\sqrt{2a} + v_{-1}2i\sqrt{2a} \\
\overset{a\neq 0}{\Rightarrow} v_{-1} &= \frac{4i\sqrt{2a} - 3i\sqrt{2a}}{2i\sqrt{2a}} \\
&= \frac{1}{2}
\end{aligned}$$

und somit

$$\begin{aligned}
\overset{(5.7)}{\Rightarrow} -1 &= u_{-1} + v_{-1} \\
&= u_{-1} + \frac{1}{2} \\
\Rightarrow u_{-1} &= -\frac{3}{2}
\end{aligned}$$

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

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

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

Kommentar: TODO: mapsto pfeil?

$$\Rightarrow v_n = -\frac{1}{u_{-2}}\left((n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^{n} v_{k-1}u_{n-k-1}\right)$$

$$
\begin{aligned}
&\overset{(5.6)}{=} -\frac{1}{2i\sqrt{2a}}\left((n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^{n} v_{k-1}u_{n-k-1}\right)\\
&= \frac{i}{2\sqrt{2a}}\left((n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^{n} v_{k-1}u_{n-k-1}\right)
\end{aligned}
$$

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

$$
v_n = -u_n = \frac{i}{2\sqrt{2a}}\left((n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^{n} v_{k-1}u_{n-k-1}\right) \qquad \forall n \geq 0 \tag{5.9}
$$

die Koeffizienten von v und u vollständig bestimmt.

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

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

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

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

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

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

Damit ist die Levelt-Turrittin-Zerlegung vollständig gegeben.

5.2.1 Konvergenz der Summanden

Kommentar: TODO: text

Es ist klar, dass

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

Deshalb wollen wir die Potenzreihen v und u und im besonderen deren konvergenzverhalten, noch genauer betrachten. Wir betrachten wir den folgenden zwei klasischen Konvergenzkriterien.

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

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

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

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

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

Beweis. Es gilt, dass $\sum_n a_n x^n$ für ein $x \in \mathbb{C}$ konvergent ist, falls

$$\exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N : \left| \frac{a_{n+1} x^{n+1}}{a_n x^n} \right| \leq \eta < 1$$

und das ist äquivalent zu

$$\lim_{n\to\infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| |x| < 1\,.$$

Also konvergiert die Reihe für alle x mit $|x| < \lim_{n\to\infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|$. □

Für $n > 0$ gilt $v_{n-1} \overset{(5.8)}{=} -u_{n-1}$ und damit wollen wir die Formel noch weiter vereinfachen, um eine Version zu bekommen, die sich gut implementieren lässt. Aus (5.9) ergeben sich zunächst für $n = 0$ die Koeffizienten

$$\begin{aligned} v_0 &= -\frac{1}{u_{-2}}((-1)u_{-1} + \sum_{k=0}^{0} v_{k-1} u_{-k-1}) \\ &= -\frac{1}{u_{-2}}(\frac{3}{2} - \frac{3}{4}) \\ &= -\frac{3}{4u_{-2}} \\ &\overset{(5.6)}{=} \frac{3i}{8\sqrt{2a}} = -u_0 \end{aligned}$$

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

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

und für $n = 2$ ist

$$\begin{aligned}
v_2 &= -\frac{1}{u_{-2}}((2-1)u_{2-1} + \sum_{k=0}^{2} v_{k-1}u_{2-k-1}) \\
&= -\frac{1}{u_{-2}}(u_1 + v_{-1}u_1 + v_0u_0 + v_1u_{-1}) \\
&= -\frac{1}{u_{-2}}(\frac{3}{2u_{-2}^2} + \frac{1}{2}\frac{3}{2u_{-2}^2} + \frac{-3}{4u_{-2}}\frac{3}{4u_{-2}} + \frac{-3}{2u_{-2}^2}\frac{-3}{2}) \\
&= -\frac{1}{u_{-2}^3}(\frac{24}{16} + \frac{12}{16} - \frac{9}{16} + \frac{36}{16}) \\
&= -\frac{63}{16u_{-2}^3} \\
&= -\frac{63}{16(2i\sqrt{2a})^3} \\
&= \frac{63}{256ia\sqrt{2a}} \\
&= -\frac{63}{256a\sqrt{2a}} = -u_2 && \overset{a=\frac{1}{8}}{\approx} -3.9375i
\end{aligned}$$

und für $n = 3$ ist

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

$$
\begin{aligned}
&= -\frac{-(4-1)63 - 8\cdot 9 + 3\cdot 63}{32u_{-2}^4} \\
&= -\frac{-8\cdot 9}{8\cdot 4u_{-2}^4} \\
&= \frac{9}{4u_{-2}^4}
\end{aligned}
$$

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

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

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

Nun vereinfachen wir die Formel:

$$
\begin{aligned}
v_n &= -\frac{1}{u_{-2}}\Big((n-1)u_{n-1} + \sum_{k=0}^{n} v_{k-1}u_{n-k-1}\Big) \\
&= -\frac{1}{u_{-2}}\Big((n-1)u_{n-1} + v_{-1}\,u_{n-1} + (\sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}\,u_{n-k-1}) + v_{n-1}u_{-1}\Big) \\
&\overset{(5.8)}{=} -\frac{1}{u_{-2}}\Big(-(n-1)v_{n-1} + v_{-1}\,(-v_{n-1}) + (\sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}\,(-v_{n-k-1}) + v_{n-1}u_{-1}\Big) \\
&= -\frac{1}{u_{-2}}\Big(-(n-1)v_{n-1} - \frac{1}{2}v_{n-1} - \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1} - \frac{3}{2}v_{n-1}\Big) \\
&= \frac{1}{u_{-2}}\Big((n-1+\frac{1}{2}+\frac{3}{2})v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1}\Big) \\
&= \frac{1}{u_{-2}}\Big((n+1)v_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} v_{k-1}v_{n-k-1}\Big)
\end{aligned}
$$

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

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

Kommentar: Um den Satz 5.8 anzuwenden, betrachten wir

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

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

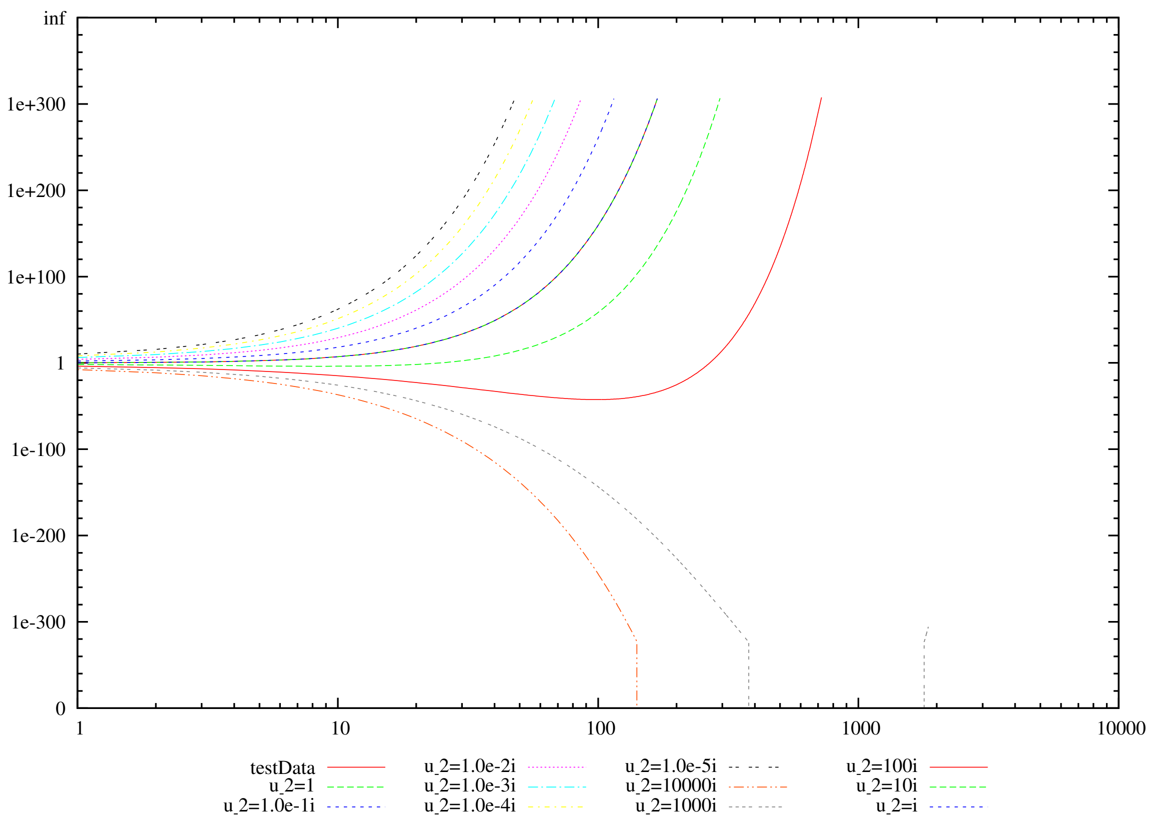
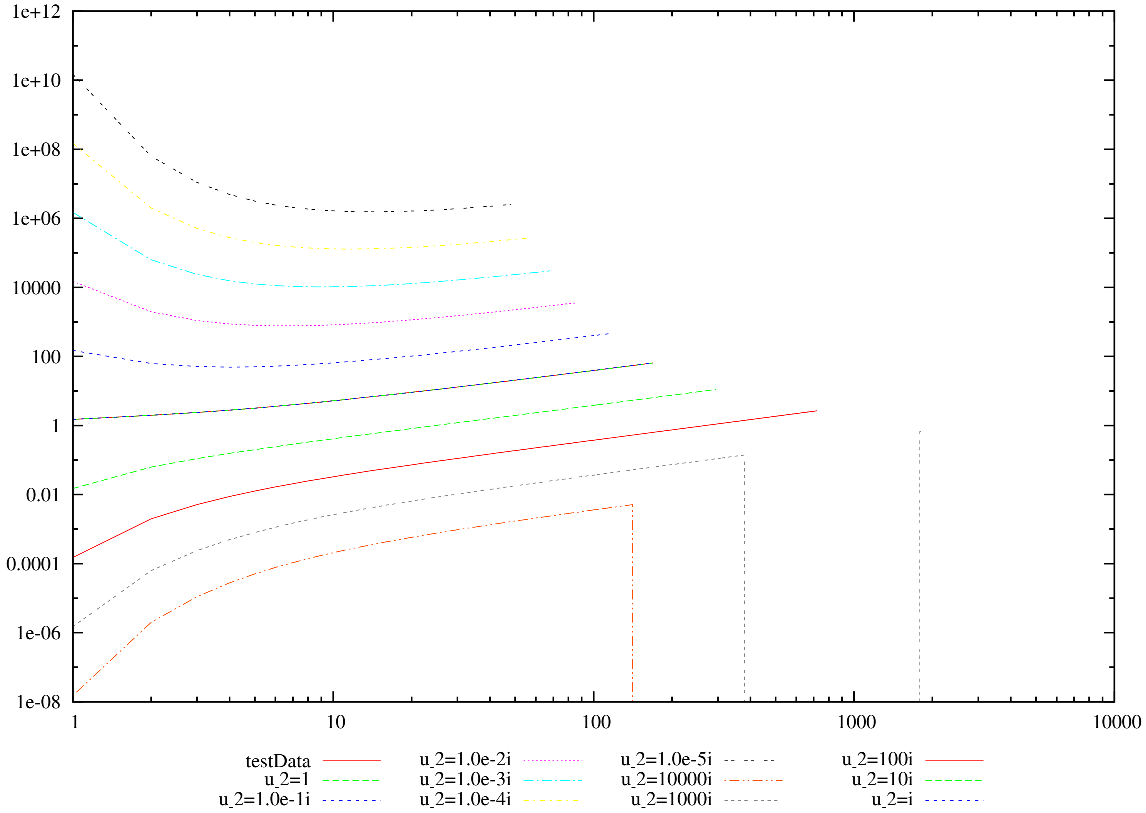
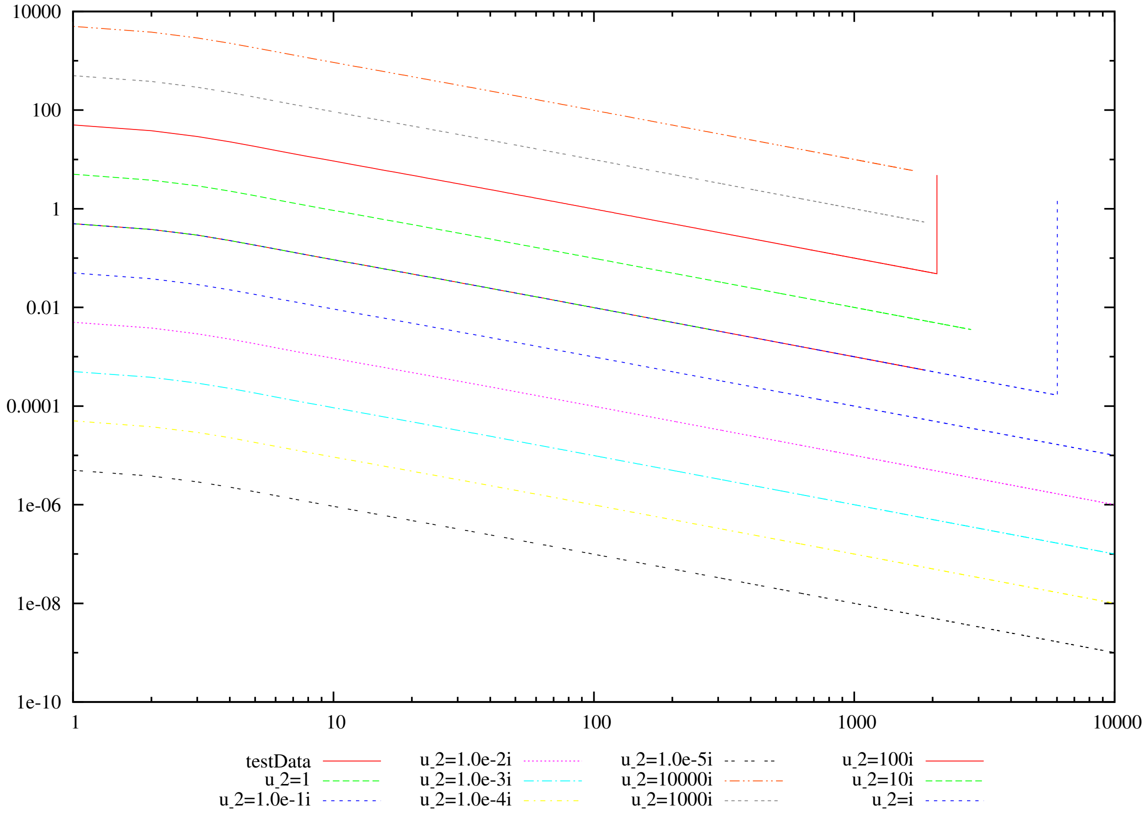


Abbildung 5.7: Die Beträge der Koeffizienten für unterschiedliche a


1e+12
1e+10
1e+08
1e+06
10000
100
1
0.01
0.0001
1e-06
1e-08
1
10
100
1000
10000
testData
u_2=1
u_2=1.0e-1i
u_2=1.0e-2i
u_2=1.0e-3i
u_2=1.0e-4i
u_2=1.0e-5i
u_2=10000i
u_2=1000i
u_2=100i
u_2=10i
u_2=i



10000
100
1
0.01
0.0001
1e-06
1e-08
1e-10
1
10
100
1000
10000
testData
u_2=1
u_2=1.0e-1i
u_2=1.0e-2i
u_2=1.0e-3i
u_2=1.0e-4i
u_2=1.0e-5i
u_2=10000i
u_2=1000i
u_2=100i
u_2=10i
u_2=i

A Aufteilung von $t\varphi'(t)$

Sei $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$, so ist $\varphi' =: \sum_{i=2}^{N} a_{-i}t^{-i} \in t^{-2}\mathbb{C}[t^{-1}]$ also $u\varphi'(t) = \sum_{i=1}^{N} a_{-i-1}t^{-i} \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$, welches wir zerlegen wollen. Zerlege also $t\varphi'(t) = \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p)$ mit $\psi_j \in \mathbb{C}[x^{-1}]$ für alle $j > 0$ und $\psi_0 \in x^{-1}\mathbb{C}[x^{-1}]$:

$$t\varphi'(t) = a_{-2}t^{-1} + \ldots + a_{-p}t^{-(p-1)} + a_{-(p+1)}t^{-p} + a_{-(p+2)}t^{-(p+1)} + \ldots + a_{-2p}t^{-(2p-1)} + a_{-(2p+1)}t^{-2p} + a_{-(2p+3)}t^{-(2p+1)} + \ldots$$

$\psi_0(t^p)$

$t^{p-1}\psi_{p-1}(t^p)$ $t\psi_1(t^p)$

also:

$$\begin{aligned}
\psi_0(t^p) &= a_{-(p+1)}t^{-p} + a_{-(2p+1)}t^{-2p} + \ldots \\
\psi_1(t^p) &= a_{-p}t^{-p} + a_{-2p}t^{2p} + \ldots \\
&\vdots \\
\psi_{p-1}(t^p) &= a_{-2}t^{p} + a_{-(p+2)}t^{2p} + \ldots
\end{aligned}$$

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

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

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

Kommentar: Stirlingzahlen

also gilt für spezielle k

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

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 $u_{-2} = i$.

```
module Main where
import ComplRat
import Data.MemoTrie (memo) -- https://github.com/conal/MemoTrie

-- parallel
import qualified Control.Monad.Parallel as P

-- for writing to file
import System.Environment
import System.IO
import Data.Time

-- returns array with the coefficients of v(t)
-- first element in array is koefficient from t^{-1}
vKoeffs :: ComplRat -> [ComplRat]
vKoeffs uMin2 = 1/2:+:0 : [koeff i|i <- [0..]]
  where koeff :: Int -> ComplRat
        koeff = memo koeff'
        koeff' :: Int -> ComplRat
        koeff' n | n >   0   = (koeff (n-1)*(fromIntegral n+1)+summe)/uMin2
                 | n ==  0   = -3/(uMin2*4)
                 | n == -1   = 1/2
                 | otherwise = 0
                 where summe = sum [koeff (k-1)*(koeff (n-k-1))|k <- [1..n-1]]

-- returns array with the coefficients of u(t)
-- first element in array is koefficient from t^{-2}
uKoeffs :: ComplRat -> [ComplRat]
uKoeffs uMin2 = uMin2 : -3/2:+:0 : (tail $ vKoeffs uMin2)

printData :: Int -> ComplRat -> IO()
printData end uMin2 = mapM_ addLine $ take end $ zip3 [0..] (tail vals) vals
  where vals       = vKoeffs uMin2
        addLine a = putStr $ genLine a

genLine :: (Int, ComplRat, ComplRat) -> String
```

```
genLine (i,v1,v2) = concat [ show  i                    , "\t"
                           , show $ betrag (i,v1,v2)    , "\t"
                           , show $ (cauchy (i,v1,v2))  , "\t"
                           , show $ quot (i,v1,v2)      , "\n" ]
  where toDbl x         = fromRational x :: Double
        betrag (_,v,_)  = fromRational $ magnitude v
        cauchy (i,v,_)  = (fromRational $ magnitude v)**(1/(fromIntegral i))
        quot (_,v1,v2)  = sqrt $ toDbl $ (magnitudeSq v2) / (magnitudeSq v1)

-- ############################################################################

main :: IO()
main = do x <- getArgs
          P.sequence_ (funcs $ head $ map (\x -> read x :: Int) x)
  where funcs x = map (saveData x) [ ("./data/u_-2=i"       , (0:+:1))
                                   {-, ("./data/u_-2=-i"      , (0:+:(-1)))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=1"       , (1:+:0))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=-1"      , (-1:+:0))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=10000i"  , (0:+:10000))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=1000i"   , (0:+:1000))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=100i"    , (0:+:100))-}
                                   {-, ("./data/u_-2=10i"     , (0:+:10))-}
                                   , ("./data/u_-2=1.0e-1i" , (0:+:1.0e-1))
                                   , ("./data/u_-2=1.0e-2i" , (0:+:1.0e-2))
                                   , ("./data/u_-2=1.0e-3i" , (0:+:1.0e-3))
                                   , ("./data/u_-2=1.0e-4i" , (0:+:1.0e-4))
                                   , ("./data/u_-2=1.0e-5i" , (0:+:1.0e-5))
                                   ]

saveData :: Int -> (String, ComplRat) -> IO()
saveData end (fn, uMin2) =
  do start <- getCurrentTime
     withFile fn WriteMode (\handle -> do
       hPutStr handle (concat $ take end $ map genLine triples))
     stop <- getCurrentTime
     putStrLn $ fn ++ " " ++ (show $ diffUTCTime stop start)
  where vals      = vKoeffs uMin2
        triples   = zip3 [0..] (tail vals) vals
```

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

```
#!/bin/sh
max=$1

if false; then
  ghc --make -threaded ./koeff.hs
  mkdir -p ./data
  ./koeff $max +RTS -N3
fi

```

```
if false; then
  art[2]="betrag"; art[3]="cauchy"; art[4]="quot";
  for i in 2 3 4; do
    name="${art[i]}"
    gnuplot << EOF
set samples 1001
set key below

set term push
set term post enh color lw 1 12 "Times-Roman"
set output "${name}.eps"

set log xy
plot for [fn in system("ls data/*")] fn every ::0::${max} using 1:${i} with lines title
    system("basename ".fn)
EOF
    epstopdf "${name}.eps" --outfile "../img/${name}.pdf"
    rm "${name}.eps"
  done
fi
```

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

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

```
150     | 0.0 :+ (-2.7737283214890534e264)    (-0.0) :+ 2.7737283214890534e264
```

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

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

n	v_n	u_n
-2	0	i
-1	$0,5$	$-1,5$
0	$0,75i$	$-0,75i$
1	$1,5$	$-1,5$
2	$-3,9375i$	$3,9375i$
3	$-13,5$	$13,5$
4	$59,34375i$	$-59,34375i$
5	$324,0$	$-324,0$
6	$-2122,98046875i$	$2122,98046875i$
7	$-16213,5$	$16213,5$
8	$141115,447265625i$	$-141115,447265625i$
9	$1376311,5$	$-1376311,5$
10	$-1,4850124677246094 \cdot 10^{7}i$	$1,4850124677246094 \cdot 10^{7}i$
11	$-1,75490226 \cdot 10^{8}$	$1,75490226 \cdot 10^{8}$
12	$2,2530628205925293 \cdot 10^{9}i$	$-2,2530628205925293 \cdot 10^{9}i$
13	$3,1217145174 \cdot 10^{10}$	$-3,1217145174 \cdot 10^{10}$
14	$-4,641652455250599 \cdot 10^{11}i$	$4,641652455250599 \cdot 10^{11}i$
15	$-7,3709524476135 \cdot 10^{12}$	$7,3709524476135 \cdot 10^{12}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
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.

[Kno64] Konrad Knopp, *Theorie und anwendung der unendlichen reihen*, Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften, Springer, Berlin, 1964.

[MR89] H. Matsumura and M. Reid, *Commutative ring theory*, Cambridge Studies in Advanced Mathematics, Cambridge University Press, 1989.

[Sab90] C. Sabbah, *Introduction to algebraic theory of linear systems of differential equations*, Vorlesungsskript, 1990.

[Sab07] ———, *An explicit stationary phase formula for the local formal Fourier-Laplace transform*, June 2007.

[Sch] J.P. Schneiders, *An introduction to d-modules*.

[Sta12] The Stacks Project Authors, *Stacks Project*, http://stacks.math.columbia.edu, December 2012.

Kommentar: TODO: Erklärung das das wirklich selbstgemacht ist