

Fachartikel 2006

Prof. Dr. Michael Braun (Hrsg.)

Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Inhaltsverzeichnis	Seite
Experimentelle Vorrichtung zur Visualisierung und Charakterisierung des Einspritzungsprozesses moderner Direkteinspritzermotoren M. Weclas, R. Zimmermann	5
Thermo- and fluid dynamic model of a multiphase screw pump, operating at very high gas volume fractions K. Rübiger, T. M. A. Maksoud, J. Ward, G. Hausmann	19
Dynamic Analysis of the Dortmund University Campus Sky Train R. Meisinger	37
Single Subject Research – ein Evaluierungsverfahren auch für die Soziale Arbeit? B. Vestner, W. Wüstendörfer	45

Experimentelle Vorrichtung zur Visualisierung und Charakterisierung des Einspritzungsprozesses moderner Direkteinspritzermotoren

Prof.Dr. Ing. Miroslaw Weclas
Dipl.-Ing. (FH) Rolf Zimmermann

Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)
der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg

Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Abstract

In diesem Paper wird eine Versuchsvorrichtung für sehr detaillierte qualitative und quantitative Untersuchungen des Einspritzvorganges im Ölbad, wie auch unter Luftatmosphäre, dargestellt. Eine Erhöhung der Dichte des Umgebungsmediums führte zu tendenziell größeren Jetkegelwinkeln und zu erheblich kürzeren Jetlängen. Das Zusammenspiel zwischen Jet und poröser Struktur (PM) ist in der vorliegenden Arbeit näher untersucht worden.

Die Entwicklung des Free Jet im Ölbad und unter Luftatmosphäre wurde auch unter dem Aspekt der „Zyklus-zu-Zyklus“ Schwankungen untersucht. Die Versuche zum Wandaufprall des Dieseljets brachten neue Versuchsergebnisse hervor. Es konnte beobachtet werden, wie sich beim Wandaufprall des Jets im Ölbad aus einer zunächst runden Aufprallzone ein dreieckiger Wandjet bildete. Bei näherer Untersuchung wurden als Einflussgrößen für die Bildung des Dreiecks die Wandaufprall-geschwindigkeit und die Zeit nach Wandaufprall identifiziert. Die Versuche des Jet-Aufpralls auf eine poröse Struktur wurde in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass die Prozesse mit zunehmendem Abstand des PM vom Düsenausgang und mit steigender Dichte des umgebenden Mediums z.T. erheblich verzögert und in ihrer Ausdehnung gehemmt werden. Eine erhebliche Bremswirkung der porösen Struktur auf den Jet konnte festgestellt werden.

1. Aktuelle Probleme der Gemischbildung und Verbrennung in Motoren

In einem modernen Verbrennungsmotor (Benzin und Diesel) ist das innere Gemischbildungsverfahren (Direkteinspritzung) als Basisverfahren für weitere Motorentwicklung gegeben. Insbesondere für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sind die direkten Einspritzverfahren in beiden Arten des Verbrennungsmotors von großer Bedeutung. Die hohen Einspritzdrücke, schnellen Injektoren und Mehrfacheinspritzungsstrategien werden aktuell als die wichtigsten Entwicklungsaspekte betrachtet (Abb. 1).

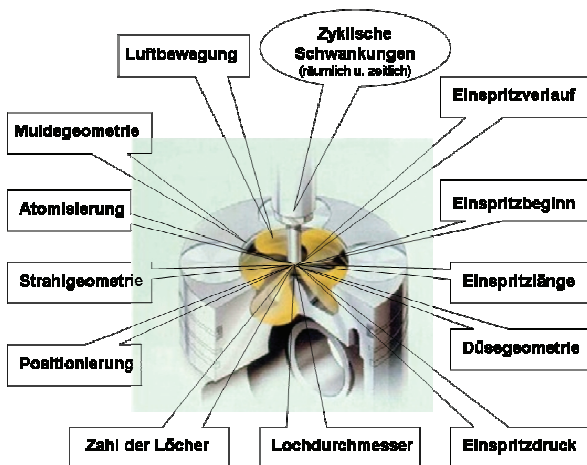


Abb.1. Die wichtigsten Parameter für Optimierung von dieselmotorischen Prozessen

Die Erhöhung des Einspritzdrucks hat primär eine feinere Zerstäubung des Kraftstoffes zur Folge. Die Kontaktfläche zwischen Kraftstoff und Luft wird somit vergrößert. Dies reduziert sowohl die Zonen, in denen fett verbrannt wird und Partikel entstehen, als auch die Zonen der thermischen NO_x -Bildung. Des Weiteren kann aufgrund der kleineren Kraftstofftropfen, welche schneller verdampfen, der gesamte Gemischbildungs- und somit Brennvorgang beschleunigt werden. Dies bedeutet, dass zum einen später mit dem Einspritzvorgang begonnen werden kann. Zum anderen kann der Motor wegen des verringerten Zeitbedarfs der Gemischbildung und Verbrennung mit höherer Drehzahl betrieben werden. Die Erhöhung des Einspritzdruckes erhöht jedoch die Eindringtiefe in den Brennraum, was zur Benetzung der Wandflächen mit resultierender HC- und Rußbildung führt. Durch die Verbrennung einer kleinen Kraftstoffmenge, die dem Brennraum durch eine Vor-Einspritzung zugeführt wird, kann dieser

thermisch vorkonditioniert und dadurch der Zündverzug der vorgemischten Phase der Haupteinspritzung verringert werden. Dies führt zu einer erheblichen Reduzierung des sog. Dieselnagelns, sowie der NO_x - und HC-Emissionen.

2. Grundlagen und Anforderungen an die Versuchsanordnung

Die hier beschriebene Vorrichtung bietet die Möglichkeit, Kraftstoff mit hohem Druck entweder in eine gasförmige Umgebung oder in ein Ölbad einzuspritzen. In beiden Modi wird die Anlage unter Atmosphärendruck betrieben. Dabei bleibt die Versuchsvorrichtung bis auf das Medium in der Kammer weitgehend unverändert. Zur Befüllung der Kammer mit Öl wird idealerweise der Versuchskraftstoff selbst verwendet. Dabei sind die Düsenbohrungen stets unterhalb des Flüssigkeitsspiegels.

Durch die höhere Dichte des Öls kann die Dichte der komprimierten Luft im Brennraum unter atmosphärischem Druck simuliert werden. Die aufwändige und sicherheitstechnisch schwer zu handelnde Konstruktion einer Druckkammer wird somit überflüssig.

Dadurch dass im Ölbadmodi Flüssigkeit in Flüssigkeit eingespritzt wird, ist das Auftreten von Atomisation und Verdampfung nicht möglich. D.h. hier kann die Zerstäubungseigenschaft einer Düse aufgrund des Fehlens eines Sprühnebel nicht beurteilt werden.

Zur Untersuchung der Strahlentwicklung und der Prozesse z.B. beim Wandaufprall wird die Einspritzung synchron durch ein Stroboskop beleuchtet. Durch Verschiebung der Phasenlage des Blitzes zu Einspritzung kann ein gewünschter Prozesszeitpunkt durch eine Kamera aufgenommen und untersucht werden. Das System bietet auch die Möglichkeit mit hoher Frequenz einzuspritzen und so für das menschliche Auge ein nahezu stehendes Bild zu erzeugen. Die Notwendigkeit einer Hochgeschwindigkeitsdarstellung entfällt hier somit.

Die Eindringtiefe des Kraftstoffjets in ein umgebendes Medium lässt sich nach [10] allgemein mit der halbempirischen Formel nach Sitkei berechnen:

$$S = C \cdot d_n \cdot Ho^{0,46} \cdot Re^{0,3} \cdot \rho^{-0,35}$$

S stellt dabei die Eindringtiefe des Einspritzstrahls in das umgebende Medium, C eine dimensionslose Konstante mit einem Wert um 0,2 und d_n den Bohrungsdurchmesser der Düse dar. Ho ist die Hodgsonzahl, Re ist die Reynoldszahl. ρ^* steht für den Quotienten aus dem Dichtewert des eingespritzten Fluids zu dem des Umgebungsfluids. Die Gleichung ist gültig für einen Reynoldszahlenbereich zwischen 4000 und 20000.

Wird die Düse mit den gleichen Parametern im gasförmigen Medium und im Ölbad betrieben, wird schnell deutlich, dass die unterschiedlichen Eindringtiefen durch das unterschiedliche Dichteverhältnis ρ^* in $-0,35$ ter Potenz zustande kommt (siehe Abb.2 und Abb.3).

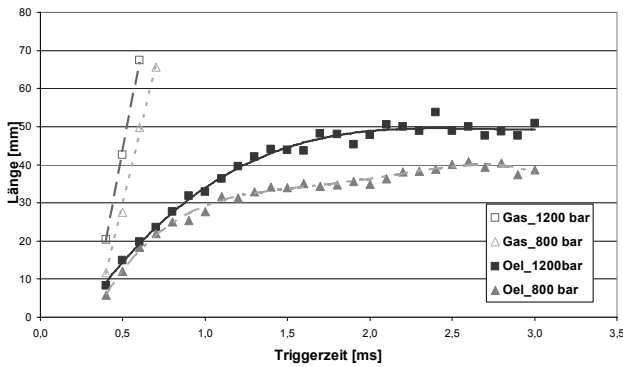


Abb.2. Jettlänge in Luft und Öl als Funktion der Zeit nach den Triggersignal für zwei Einspritzdrücke und $\tau=1500\mu s$

3. Physikalischer Hintergrund des Verfahrens in Öl-Kammer

Beim Eintreten des Kraftstoffes in die Düsenbohrung wird das Fluid stark beschleunigt und es entsteht aufgrund der scharfen Bohrungseinlasskanten eine hochturbulente Strömung. Diese Vorgänge führen dazu, dass der Dampfdruck des Kraftstoffes lokal unterschritten wird und sich Dampf bildet. Dieser legt sich nach [8] zunächst in Form eines Filmes an die Innenseite der Bohrung, löst sich jedoch bei höheren Drücken und Strömungsgeschwindigkeiten von der Wand ab und tritt in Form von kleinen Dampfbläschen aus der Düse aus (Abb.4).

Diese lösen sich von der Kante ab und bewegen sich in Wandungsnähe Richtung Düsenaustritt, wobei sie auf diesem Weg in sich zusammenfallen und Wirbel hinterlassen (Abb.4).

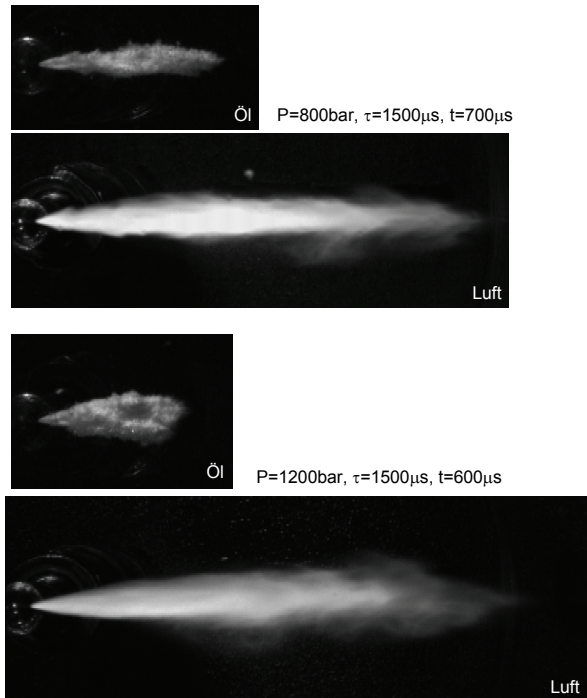


Abb.3. Freistrah in Luft und Öl für zwei Einspritzdrücke: 800bar und 1200 bar ($\tau=1500\mu s$)

Diese sind dann aufgrund ihrer Reflexions- und Brechungseigenschaften mit bloßem Auge zu erkennen.

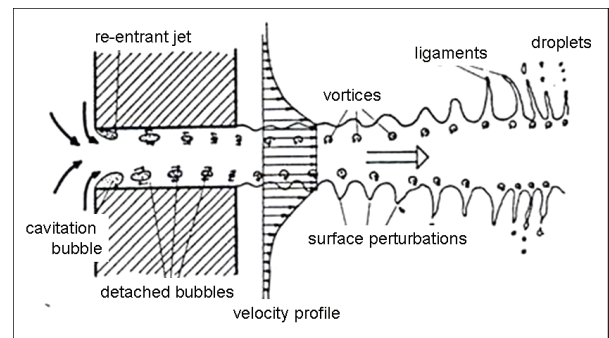


Abb.4 Kavitationsmodell [8]

4. Testkammer und Versuchseinrichtung

Das Kernstück der Kammer besteht aus einem 170mm langen Plexiglaszylinder mit 150 mm Außendurchmesser und 5 mm Wandstärke. In diesen wurde als Überlauf ein Plexiglasröhrchen radial eingeklebt, so dass der eingespritzte Kraftstoff wieder in den Vorratstank zurückgeführt werden kann. Um den optischen Zugang zur Einspritzung auch von der Unterseite des

Zylinders zu gewährleisten wurde der Boden der Kammer ebenfalls aus Plexiglas hergestellt (Abb.5 und 6).

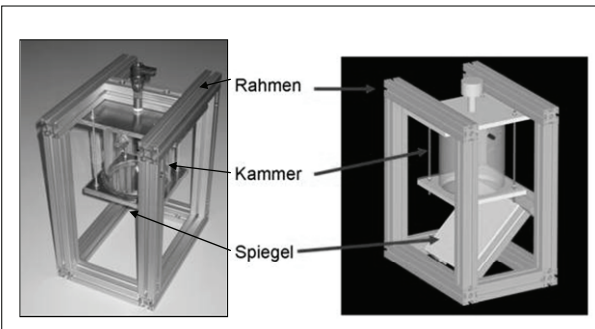


Abb.5 Grundkonstruktion der Testkammer und Versuchstandes

Dieses Plexiglasmodul ist zur statischen Stabilisierung zwischen zwei Metallplatten gespannt, die mit geeigneter Öffnung für den optischen Zugang (unten) bzw. für die Aufnahme des Injektors versehen sind. Diese Einheit wiederum ist an einem Rahmengestell aus Aluminiumprofilen befestigt, welches u.a. auch Teile des Hochdrucksystems, die Kamera und die Stroboskoplampen aufnimmt.

Der Deckel der Anordnung ist ebenfalls ein Aluminium-Frästeil. Er verfügt über eine Nut, in die der Plexiglaszylinder eingreift. Weiterhin besitzt der Deckel eine mittige Bohrung, durch welche der Injektor in die Kammer hereinragt. Wegen der Drucklosigkeit der Kammer ist einer gesonderten Abdichtung nach oben hin sowohl an der Injektordurchführung als auch an der Kontaktfläche Deckel/Zylinder nicht notwendig.

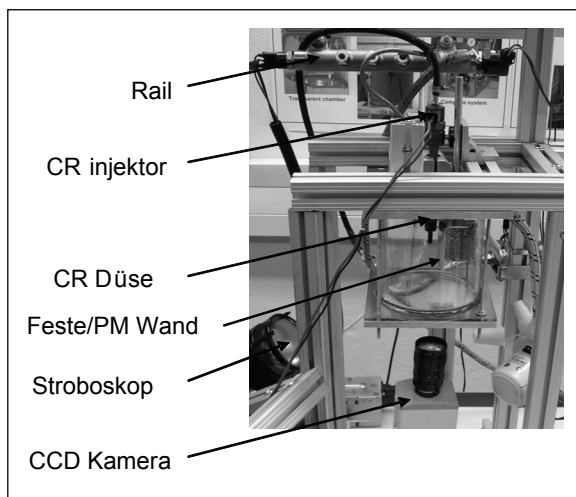


Abb.6 Testkammer

Das Injektorsteuerungssystem (Abb. 7 und 8) ermöglicht über einen definierten Ausgangs-

signalverlauf die Ansteuerung des Injektors. Die Parameter der Ansteuerung, also Flankensteigung, Bestromungszeit und Spannung sind dabei vollkommen frei wählbar. Das erlaubt die Programmierung einer Einspritzsequenz durch eine Hüllkurve mit maximal 16 Stützstellen. Dies bedeutet, dass insgesamt acht Einspritzungen innerhalb einer Einspritzsequenz dargestellt werden können. Die Auslösung der Einspritzsequenz erfolgt entweder über eine am Gerät angebrachte Taste, oder, wie im beschriebenen Aufbau ausgeführt, über einen Triggereingang in Form einer BNC-Buchse.



Abb.7. Elektronische Injektorsteuerung von Genotec (CR-Piezoinjektoren)

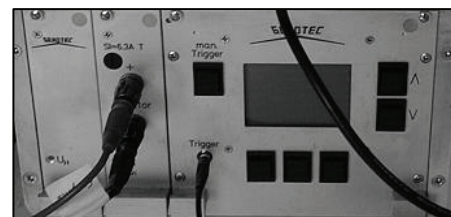


Abb.8. Elektronische Injektorsteuerung von Genotec (CR-Magnetinjektoren)

Der hier beschriebene Versuchsaufbau bietet neben den bereits dargestellten Vorzügen (einfacher und kostengünstiger Aufbau, Wegfall der Notwendigkeit einer Hochgeschwindigkeitsvisualisierung) zudem ein sehr hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit (z.B. Betrieb von Magnet- und Piezo-Injektoren). Einzelne Module der Versuchseinrichtung sind mit geringem Kosten- und Arbeitsaufwand an individuelle Versuchsanforderungen anzupassen. Viele Systemkomponenten können einfach ausgetauscht werden. Daraus ergibt sich ein sehr hohes Nutzpotalential.

Ein zusätzliches Leistungsmerkmal des Systems ist eine Raildruckregelung. Geregelt wird durch einen Eurotherm 2048 PID-Regler. In ihm ist die Kennlinie des Raildrucksensors hinterlegt. Aufgrund der Gefahr von Überschwängern und weiteren regelungstechnischen Problemen wird

hier auf den Einsatz des Reglers verzichtet, da der Versuchsaufbau über keinen Schutz vor Überdruck verfügt. Beim Bersten von Systemteilen besteht Gefahr für den Anwender. Der Regler wird lediglich zur Anzeige des aktuellen Raildrucks verwendet. Für den Betrieb der Versuchseinrichtung und um die Versuchsergebnisse festhalten und auswerten zu können ist eine Reihe an zusätzlichen Apparaten notwendig. Dabei lassen sich diese Geräte durch ihre Funktion in die Kategorien Steuer- und Messgeräte unterteilen. Die wichtigsten Geräte sollen im Folgenden kurz beschrieben werden (Abb.9).

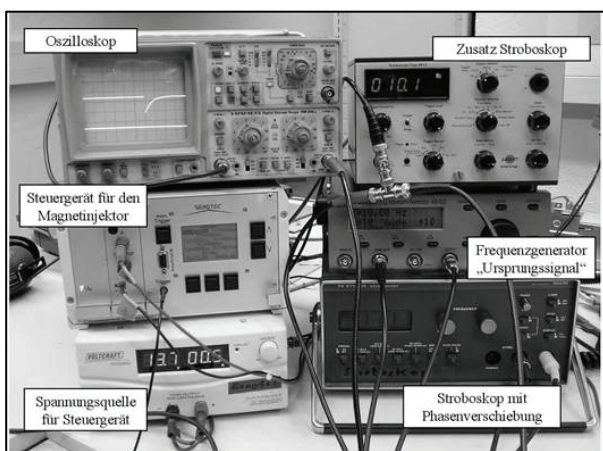


Abb.9. Ansicht der elektronischer Steuerung und Signalanalyse

Vorförderdruck

Der Vorförderdruck ist der Druck, der saugseitig an der Hochdruckpumpe herrscht. Erzeugt wird er durch die Kraftstoffpumpe EKP1 (siehe Abb.10). Angezeigt wird er von dem an der Testkammer angebrachten Manometer.

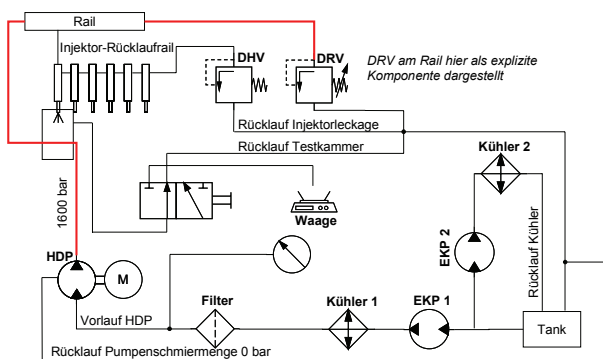


Abb.10. Schematische Darstellung des Hydraulik-Funktionsplans

Vorwahl des Raildrucks

Der Raildruck wird über die Bestromung des Druckregelventils (DRV) vorgewählt.

Systemkühlung

Vor Einschalten der Hochdruckpumpe muss der Umwälzkühlkreislauf „Kühler 2“ aktiviert werden. Der Vorlaufkühler „Kühler 1“ wird mit Einschalten der Hochdruckpumpe automatisch durchströmt.

Hochdrucksystem

Für die Versuche wurde ein herkömmliches Common-rail System verwendet. Elektromotor, Hochdruckpumpe, Vorförderdruck von min. 0,5 bar durch konventionelle Kraftstoffpumpe, die das Öl erst durch einen Kraftstofffilter und anschließend durch den Kühler pumpt. Am Rail wird nur ein Injektor angeschlossen, wobei die anderen Anschlüsse verschlossen sind. Am Rail befindet sich das Druckregelventil (DRV), über welches der Druck im Rail durch Steuerung der Ventilspannung eingestellt wird. Auch der Raildrucksensor (RDS) befindet sich am Rail. Er gibt eine Spannung aus, die einem bestimmten Druck zugeordnet ist.

Injektoransteuerung

Der Magnetinjektor wurde mit Hilfe der Injektoransteuerung V2.1 der Firma Genotec betrieben (Abb.8). Es handelt sich bei der Injektoransteuerung um eine komplette Steuereinheit für Dieselinjektoren, die sich in die Hauptkomponenten gliedert: Überspannungserzeugung, Injektoren-endstufe und Steuer- und Kontrolleinheit. Die Steuer- und Kontrolleinheit ermöglicht über ein Bedienteil an der Front der Ansteuerung die Eingabe einer gewünschten Pulsfolge, die nach erfolgter Triggerung ausgegeben werden soll. Dabei können die Parameter: Anzugsdauer des jeweiligen Pulses, Haltedauer, Pausendauer zwischen zwei Pulsen variiert und vorgewählt werden.

Frequenzgenerator

Das Versuchssystem nutzt ein M&R Systems arbitrary morphing wave form Generator WG – 820. Hierbei handelt es sich um einen Frequenzgenerator, der über BNC Buchsen u. a. ein TTL Signal erzeugt. Dieses Signal diente bei den hier gezeigten Versuchen als Ursprungssignal. Der erzeugbare Frequenzbereich liegt zwischen 1Hz und 10 MHz.

5. Messtechnik

Stroboskope zur Visualisierung

Zur Darstellung des Einspritzvorganges werden zwei Stroboskope verwendet: Philips PR9112 Hochleistungsstroboskop. Hierbei handelt es sich um ein extern triggerbares Stroboskop mit einer Xenon-Quarz Blitzröhre. Die mittlere Beleuchtungsstärke beträgt min. 1800 Lux (bei 0,5m Entfernung). Das Gerät verfügt über eine 5 – polige Diodenbuchse (180°) für den Eingang des Triggersignals und über eine ebenfalls 5-polige Diodenbuchse (240°) für den Ausgang eines Triggersignales zur Steuerung weiterer Geräte. Als zweites Stroboskop wird verwendet ein Brüel & Kjær Stroboskop Type 4913. Dieses Gerät ist über einen BNC Anschluss extern triggerbar. Der Lichtwerfer ist mit einer Xenon Entladungsröhre ausgestattet. Die Blitzdauer bei halber Scheitellichtstärke beträgt etwa 3 ms, die Beleuchtungsstärke bei 0,5 m Abstand etwa 7000 Lux.

Oszilloskop zur Zeitmessung

Zum Messen der Phasenverschiebung zwischen dem Ausgangssignal des Frequenzgenerators und dem des Ausgangssignals des Stroboskop (Philips) wurde ein Oszilloskop vom Typ Hemag HM 205-2 verwendet.

CCD Kamera

Die PCO FlashCam Schwarz/Weiß CCD – Videokamera kann durch ein externes Triggersignal gesteuert werden und bietet dabei die Möglichkeit, zusätzlich zur Belichtungszeit (1 μ s-1ms) eine Verzögerung einzustellen. Zudem sind Mehrfachbelichtungen möglich. Bei der vorgeschalteten Optik handelt es sich um eine Cosmicar TV zoom Linse 12,5mm-75mm, 1:18 mit C- Mount Anschluss. Das abzubildende Objekt wird über die Optik auf den CCD Chip projiziert. Belichten und Auslesen erfolgen zeitversetzt durch ein Triggersignal. Kameraintern werden die Bilddaten zunächst durch einen 8 Bit A/D Wandler digitalisiert und in den Bildspeicher geschrieben. Für den Analogausgang der Kamera wird das Signal anschließend wieder durch einen 8 Bit D/A Wandler zurückgewandelt.

Das Auslesen des CCD Chips benötigt 19,9ms. Für diese Zeit ist der Triggereingang gesperrt und eingehende Signale werden ignoriert. Daraus ergibt sich eine max. mögliche Aufnahmefrequenz von 50 Hz. Die Kamera gibt ein Analogsignal über eine BNC Buchse (nach RS170-Norm) aus, das über eine Bildverarbeitungskarte (Frame Grabber)

eingelezen und digitalisiert wird.

Zeitdarstellung

Um für alle Versuchereignisse eine gemeinsame zeitliche Referenz zu schaffen, wurden alle zeitrelevanten Signale in Abhängigkeit zu dem vom Frequenzgenerator erzeugten „Ursprungssignal“ gesetzt. Dieses TTL- Signal wurde direkt an das Injektorsteuergerät der Fa. Genotec weitergeleitet und dadurch getriggert. Dieses wiederum steuerte dadurch den Injektor entsprechend des zuvor in der Kontroll- und Steuereinheit des Gerätes eingestellten Stromprofils an, so dass sich die Injektornadel durch den Elektromagneten hebt und die Düse freigibt. Es kommt zur Einspritzung.

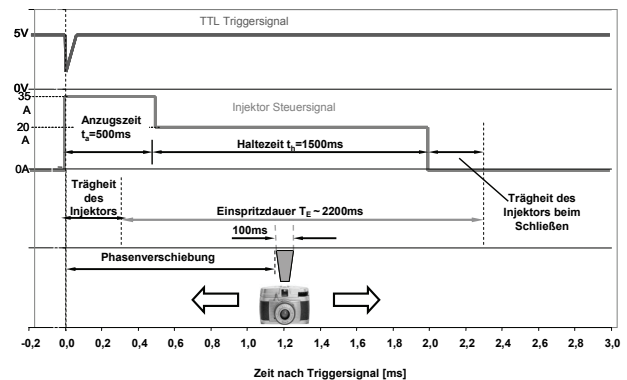


Abb.11. Definition der Zeitmessung

Vom Frequenzgenerator wird neben diesem „Injektorsignal“ durch einen weiteren, parallelen Zweig das Ursprungssignal abgegriffen und in das erste Stroboskop geleitet. Dieses Stroboskop kann extern getriggert werden, aber es kann auch an andere Geräte ein Triggersignal ausgeben und dieses Signal durch Phasenverschiebung gegenüber dem Eingangssignal verzögern (Abb.11). D.h. dass alle Geräte die durch das Stroboskop getriggert werden, diese Phasenverschiebung mit erleiden. Mit diesem verzögerten Signal aus dem ersten Stroboskop werden parallel das zweite Stroboskop, die Kamera und der Frame Grabber des Computers angesteuert. Durch diesen Aufbau lässt sich jeder relevante Zeitpunkt nach dem Einspritzbeginn des Injektors mit den Stroboskopen beleuchten und durch die Kamera aufnehmen (Abb.12).

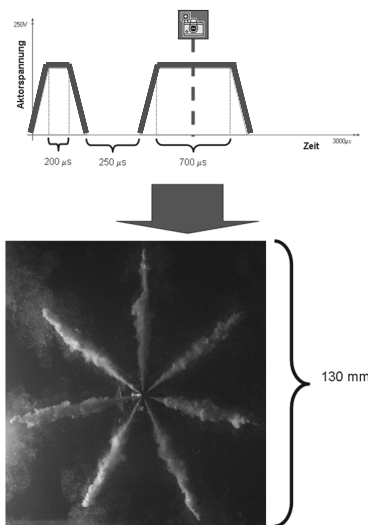


Abb.12. Einspritzcharakterisierung in Öl für eine Piezo-7-Loch CR Düse ($p=900\text{bar}$)

6. Potential der Testkammer in Untersuchung des Einspritzprozess

Verschiedene Einspritzparameter und Prozesse, wie zum Beispiel Strahlbildung oder Wandaufprall, können in dieser Kammer detailliert untersucht werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele der unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten der Kammer dargestellt und kurz beschrieben.

6.1. Allgemeine Charakteristik des Einspritzvorganges (Strahlbildung)

Die folgenden Parameter des Freistrahls können vermessen bzw. rekonstruiert werden (siehe Abb.13): Jetlänge, Geschwindigkeit, Flächeninhalt, Geschwindigkeit des Schwerpunktes, Länge der Konturlinie, Jetbreite, Jetwinkel (Kegelwinkel), vertikaler und horizontaler Durchmesser.

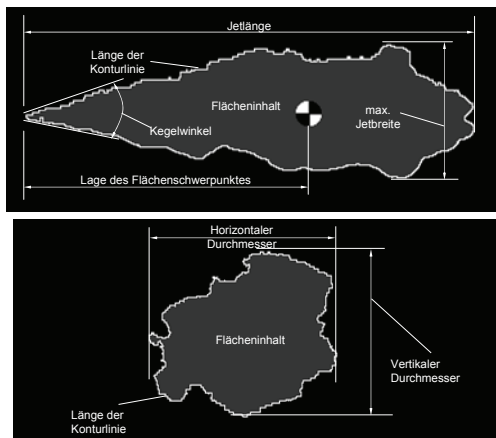


Abb.13. Grundparameter des Freistrahls

Ein Beispiel der Dieselstrahlausbreitung in Luft unter atmosphärischen Druck ist in Abb.14 dargestellt.

Der Entwicklungsverlauf des Jets im Ölbad gleicht prinzipiell dem, der unter Luftatmosphäre entsteht. Dabei bleibt aber der Jet im Ölbad erwartungsgemäß erheblich kleiner bzw. erreicht die gleiche räumliche Ausdehnung erst deutlich später, da er sich gegen die drastisch höhere Dichte des Öles ausbreiten muss. Der Jetkegelwinkel ist im Ölbad größer, entsprechend der Theorie nach [8].

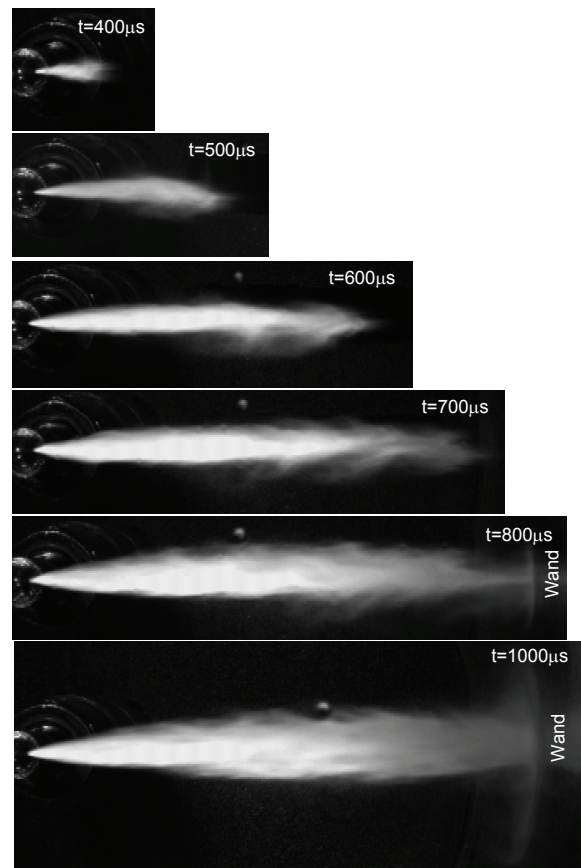


Abb.14. Freistrahlausbreitung in Luft unter atmosphärischen Bedingungen; $p=800\text{bar}$, $\tau=1500\mu\text{s}$ (2-Loch Düse)

Da die Parameter nicht nur für einen oder wenige Zeitpunkte zur Verfügung stehen, sondern deren Verlauf über ein weites Zeitfenster mit einer ausreichend hohen zeitlichen Auflösung ($100\mu\text{s}$) aufgenommen wurden, konnten durch zeitliche Ableitung der Parameterverläufe die Geschwindigkeitsverhältnisse ermittelt werden. Sinnvollerweise erfolgte hierbei eine Beschränkung auf die Geschwindigkeit der Jetspitze und der des Flächenschwerpunktes.

Bei axialer Betrachtung des Jets (so dass er sich auf den Betrachter hin ausbreitet) können weitere Parameter ermittelt werden. Neben dem

Flächeninhalt und der Länge der Konturlinie der Frontansicht kann aus der horizontalen und der vertikalen Ausdehnung ein gemittelter Durchmesser errechnet werden (Abb.15). Durch zeitliche Ableitung der Parameterverläufe ist es möglich, die Geschwindigkeit der Durchmesserzunahme ($\Delta D/\Delta t$) zu ermitteln (Abb.16).

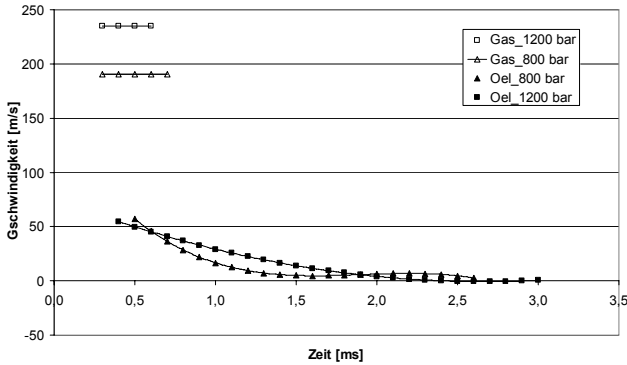


Abb.15. Freistrahlggeschwindigkeit in Luft und in Öl für zwei Einspritzdrücke (für Gas Zeit bis Wandaufprall)

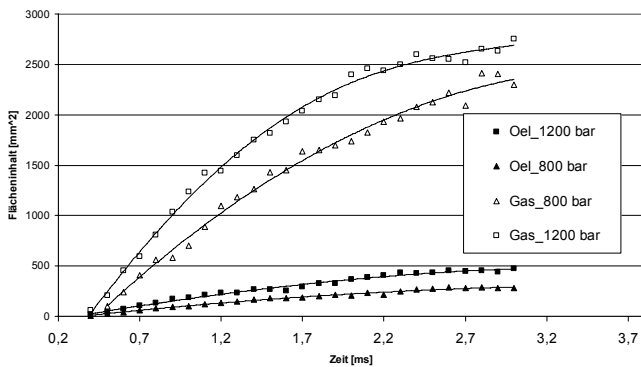


Abb.16. Freistrahlfäche gemessen in Luft und in Öl für zwei Einspritzdrücke (Zeit bis Wandaufprall)

6.2. Wandaufprall: feste Wand

Der Jetaufprall auf eine feste Wand wird nach [9] definiert (siehe Abb.17).

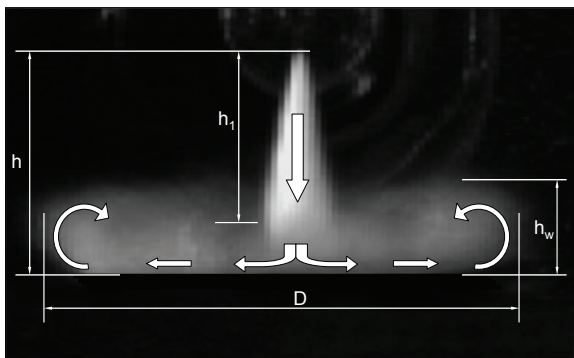


Abb.17. Model des Jetaufpralls auf eine feste Wand

Demnach lässt sich der Ablauf in drei Regionen oder Phasen einteilen. Der erste Bereich wird von der Anwesenheit der Wand nicht beeinflusst und entspricht in seinem Verhalten und Erscheinungsbild dem Free Jet.

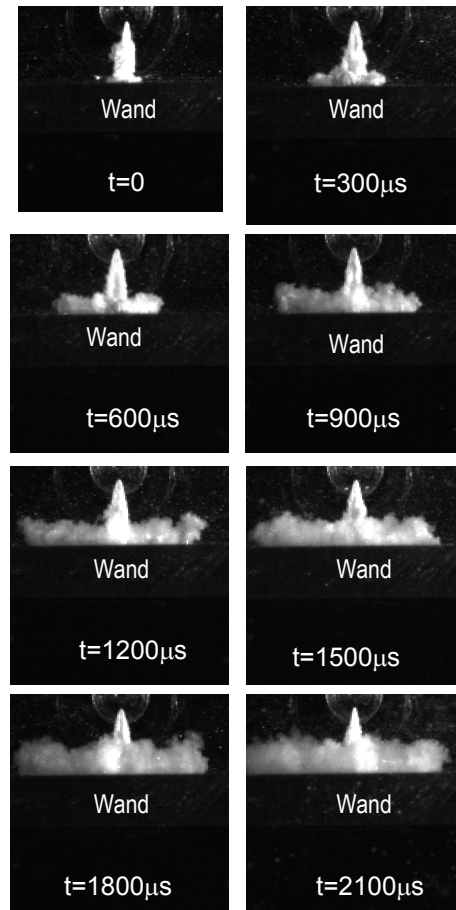


Abb.18. Wandaufprall auf einer festen Wand für p=800bar in Öl (Zeit nach Wandberührung)

Die zweite Phase ist der Bereich, in welchem sich der eigentliche Wandaufprall ereignet. Dieser Bereich beginnt definitionsgemäß an der Stelle, an der die Geschwindigkeit in der Hauptachse von der des Free Jet abweicht. Im Anschluss an die Verzögerung der axialen Geschwindigkeit des Jets wird dieser umgelenkt und anschließend radial beschleunigt (Abb.18).

Eine quantitative Charakterisierung der Aufprallzone wird in Abb.19 gezeigt. Hier wird ein gemittelter Durchmesser der Aufprallzone gemessen.

Der Vergleich zwischen dem Wandaufprall des Jets im Ölbad und dem unter Luftatmosphäre bringt zunächst ein ähnliches Ergebnis wie die

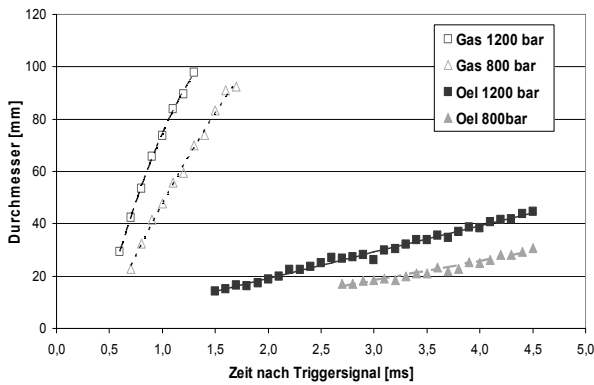


Abb.19. Gemittelter Durchmesser in der Aufprallebene in Luft und Öl für x=30mm, p=800bar und p=1200bar (siehe Abb.13)

Gegenüberstellung der Entwicklung des Free Jets unter dem Einfluss von Öl und Luft. Die Gestalt des Wandaufpralls und die des Radialjets ist im Ölbad kleiner als die unter Gasatmosphäre.

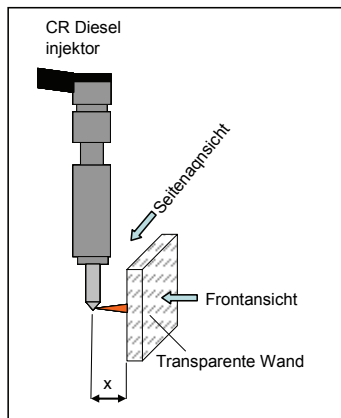


Abb.20. Einrichtung für Visualisierung des Wandaufpralls

Ein Beispiel der Visualisierung des Dieseljetaufpralls wird in Abb.21 dargestellt. Dieses Bild zeigt die Ergebnisse für zwei Einspritzdrücke (800bar und 1200bar) im Ölbad für zwei Wandabstände X=7mm und X=30mm – siehe Abb.20.

Für einen geringen Abstand des Düsenausganges zur Wand konnte für Zeiten nach dem Wandaufprall größer als etwa 1200 μs eine Aufprallzone beobachtet werden, die eine Dreieck-Geometrie aufweist [16]. Durch die Nutzung bestehender Theorien kann diese Phänomen noch nicht erklärt werden.

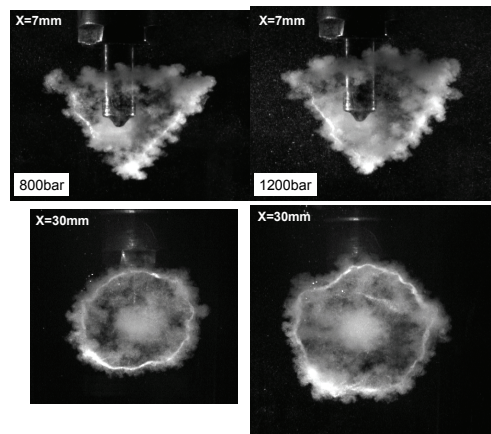


Abb.21. Frontansicht des Wandaufpralls für zwei Einspritzdrücke und zwei Wandabstände (X) gemessen in Ölbad

6.3. Wandaufprall: poröse Struktur

Unter dem Wandaufprall eines Kraftstoffstrahls verstand man bisher vor allem das Zusammenwirken eines Jets mit einer festen, d.h. undurchlässigen Wand, wie es bereits in Kapitel 6.2 beschrieben wurde.

Nahezu unerforscht hingegen ist das Zusammenspiel zwischen einem Kraftstoffstrahl und einem hochporösem Material (Abb.22).

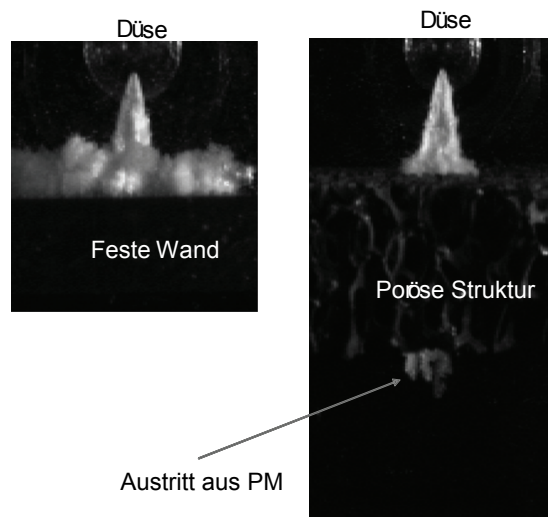


Abb.22. Vergleich eines Wandaufpralls auf einer festen Wand (links) und poröse Struktur (rechts)

Bekannt sind bisher lediglich die in [11,14,15] veröffentlichten Untersuchungen. Hier wurde ein erstes Modell gegeben, welches den Prozessablauf des Aufpralls beschreibt. Demnach

kann dieser in vier Phasen gegliedert werden (siehe Abb. 23).

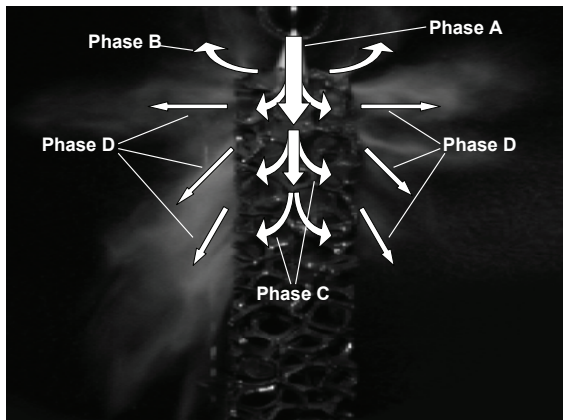


Abb.23. Modell des Jet-Wandaufpralls auf ein Poröses Medium nach

Wie beim Wandaufprall auf einer festen Wand entspricht die erste Phase (Phase A) dem Free Jet. Phase B beschreibt den Wandrückprall, d.h. der Teil des Jets, der nach Auftreffen auf die Struktur wieder reflektiert wird. Nachdem der Anteil des Jets, der nicht zurückgeworfen wurde in das PM eingedrungen ist, erfolgt eine räumliche Verteilung des Kraftstoffes im Gefüge.

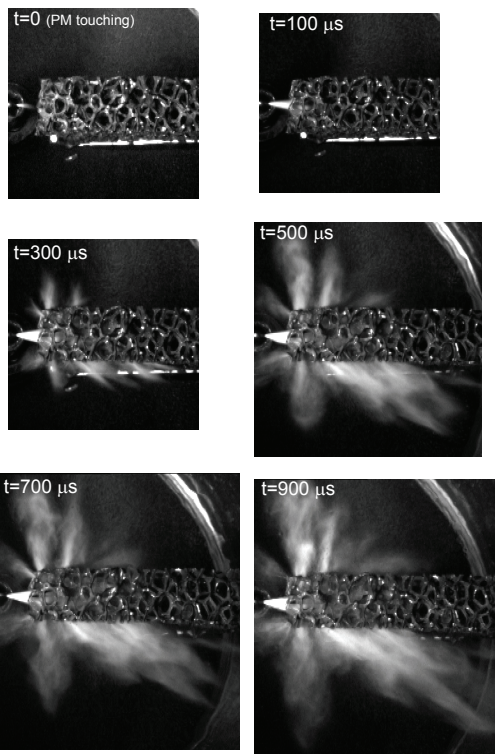


Abb.24. Diesel Jet-Aufprall auf ein Poröse Struktur (10ppi Porendichte) für $p_{inj}=1200\text{bar}$ in Luft ($p=1\text{bar}$)

Dies geschieht als Folge des in [11,14] als Multi-Jet-Splitting bezeichneten Prozesses. Hierbei wird durch den Aufprall des Primärjets auf die Stege der Struktur dieser in mehrere Sekundärjets zerteilt und abgelenkt (Phase C mit Multi-Jet-Splitting). In der letzten Phase (Phase D) kommt es wieder zum Austritt des Kraftstoffes aus dem PM. Dies geschieht in Form von vielen Sekundärjets, die sich entsprechend des verbleibenden Impulses und ihrer jeweilig aufgeprägten Richtungskomponente entwickeln (siehe Abb.24).

Das Multi-Jet-Splitting kann in Abb.25 noch genauer angesehen werden.

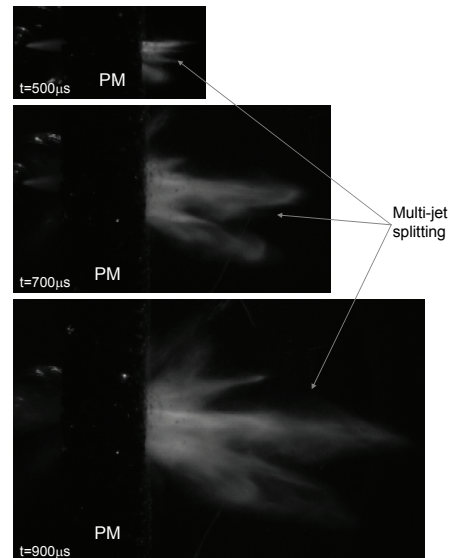


Abb.25. Jetaufprall auf eine poröse Struktur in Luft und Multi-jet Splitting Effekt; 2-Loch Düse, $p=1200\text{bar}$

6.4. Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen des Einspritzvorganges

Der Einspritzprozess in Verbrennungsmotoren unterliegt gewissen Schwankungen, den sog. Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen. Diese äußern sich darin, dass trotz konstanter Einspritzparameter (wie z.B. Einspritzdruck, -dauer, etc.) kein Parameterwert (z.B. Jetlänge) exakt eingestellt werden kann, sondern nur eine Aussage über dessen Auftretenswahrscheinlichkeit möglich ist (Abb.26).

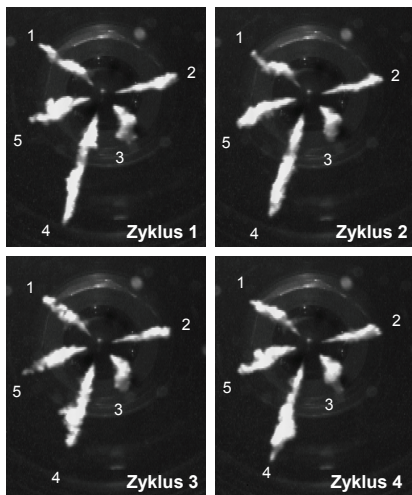


Abb.26. Vier Einspritzzyklen der CR 5-Loch Düse in Öl (p=700bar, τ=1500μs)

Abbildung 27 zeigt eine extreme Abweichung der Eindringtiefe vom Durchschnitt bei Darstellung im Gegenlicht.

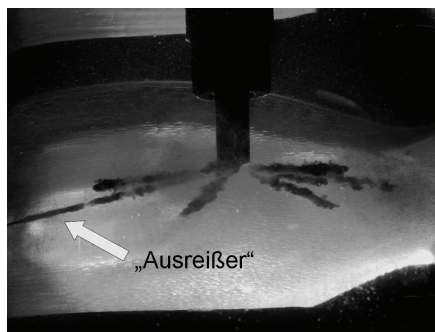


Abb.27. „Ausreißer“ bei Dieseleinspritzung (7-Loch CR Piezo-Injektor)

Auch wenn hier nicht auf die Ursachen dieses Phänomens eingegangen werden kann, so muss doch festgestellt werden, dass derartige Unregelmäßigkeiten zwangsläufig auch im Verbrennungsmotor auftreten und der Einspritzprozess somit nicht sauber reproduzierbar ist. Dies wirkt sich in jedem Fall negativ auf den Gemischbildungs- und somit auch auf den Verbrennungsprozess aus.

Die Standardabweichung für die Messungen der Jetlänge für eine 2-Loch CR Dieseldüse ist in Abb.28 dargestellt.

Markante Unterschiede zwischen den Abweichungen im Ölbad und unter Luftatmosphäre sind aufgrund des sehr schnellen Prozessablaufes unter Luftatmosphäre und der daraus resultierenden geringen Anzahl an Messpunkten (bei der gegebenen Zeitauflösung) nicht ermittelbar.

Die gewonnenen Werte liegen jedoch für beide Umgebungsmedien

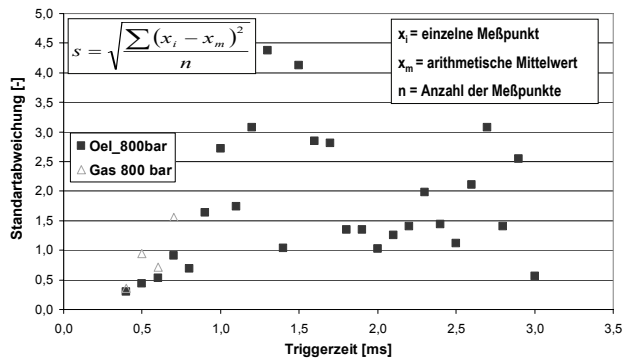


Abb.28. Standardabweichung der Jetlänge für 2-Loch CR Dieseldüse in der gleichen Größenordnung.

6. Zusammenfassung

In diesem Paper wurde eine Versuchsanordnung für sehr detaillierte qualitative und quantitative Untersuchungen des Einspritzvorganges im Ölbad wie auch unter Luftatmosphäre dargestellt. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse aus den Versuchen zum Free Jet unter Luftatmosphäre zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gegebenen Modellen der Strahlentwicklung. Eine Steigerung des Einspritzdruckes führte zu größeren Raumeindringtiefen und zu höheren Geschwindigkeiten des Jets. Eine Erhöhung der Dichte des Umgebungsmediums führte zu tendenziell größeren Jetkegelwinkeln und zu erheblich kürzeren Jetlängen. Das Zusammenspiel zwischen Jet und poröse Struktur (PM) ist in der vorliegenden Arbeit näher untersucht worden.

Hierzu wurden als Vergleichs- und Referenzprozesse des Free Jets, sowie der Jet-Aufprall auf eine feste Wand herangezogen. Die Entwicklung des Free Jet im Ölbad und unter Luftatmosphäre wurde auch unter dem Aspekt der „Zyklus-zu-Zyklus“ Schwankungen untersucht. Dabei konnte zu deren Darstellung die Standardabweichung und die Spannweite genutzt werden. Die Versuche zum Wandaufprall des Dieseljets brachten teilweise völlig unerwartete Versuchsergebnisse hervor. Es konnte beobachtet werden, wie sich beim Wandaufprall des Jets im Ölbad aus einer zunächst runden Aufprallzone ein dreieckiger Wandjet bildete. Bei näherer Untersuchung dieser Ergebnisse wurde als eine Einflussgröße für die Bildung des Dreiecks der Wandabstand vom Düsenausgang identifiziert. Ein geringer Abstand der Aufprallebene vom Düsenausgang ermöglicht die Bildung besagter Dreiecke. Eine zunehmende Vergrößerung des

Abstandes führte zu immer weniger deutlich ausgeprägten Dreiecken, bis schließlich der Wandjet wieder die gewohnt runde Form besitzt. Es konnte gezeigt werden, dass der charakteristische Einfluss der Versuchsparameter Einspritzdruck und Dichte des umgebenden Mediums bei den Prozessen des Jet-Wandaufpralls zunächst ähnliche Auswirkungen hat, wie sie bei den Untersuchungen zum Free Jet festgestellt wurden. Mit steigendem Einspritzdruck wachsen die Werte der Charakterisierungsgrößen, mit zunehmender Dichte des umgebenden Mediums verkleinern sie sich. Die Versuche des Jet-Aufpralls auf eine poröse Struktur wurden in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass die Prozesse mit zunehmendem Abstand des PM vom Düsenausgang und mit steigender Dichte des umgebenden Mediums z.T. erheblich verzögert und in ihrer Ausdehnung gehemmt werden. Eine erhebliche Bremswirkung der porösen Struktur auf den Jet konnte festgestellt werden. Jedoch zeigte sich auch, dass eine Vergrößerung der Anzahl der zu durchlaufenden Poren kaum eine zusätzliche verzögernde Wirkung auf den Jet hat. Alle Versuchstypen konnten, z.T. sehr eindrucksvoll, das Potential des PM durch das sog. „Multi-Jet-Splitting“ zur Homogenisierung des Dieseljets zeigen.

Literatur

- [1] Bai, C., Gosman, A.D. 1995, Development of Methodology for Spray Impingement Simulation, SAE Paper 950283.
- [2] Berg, E. 2003, DIME Validation of Spray-Wallinteraction Models, September 22th, 2003 Valencia, Spain
- [3] Cossali, G.E., Brunello, G., Coghe, A., Marengo, M. 1999, Impact of a single drop on a liquid film: experimental analysis and comparison with empirical models, Italian Congress of Thermofluid Dynamics UIT, Ferrara, 30June-02 July, 1999.
- [4] Durst, F., Weclas, M. 2001, A new type of internal combustion engine based on the porous-medium combustion technique, Proc. I. Mech.Engnrs, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 215, 2001.
- [5] Durst, F., Weclas, M. 1999, Porous Medium (PM) Combustion Technology and its Application to Internal Combustion Engines: A new concept for a near-zero emission engine, [in:] Applied Optical Measurements, Ed. M. Lehner & D. Mewes, Springer, 1999.
- [6] Grover, R.O., Assanis, D.N. Jr. 2001, A spray wall impingement model based upon conservation principles, The 5th Int. Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, COMODIA 2001, Nagoya July 1-4, 2001.
- [7] Pano, M.R., Moreira, A.L. 2002, Visualization and analysis of spray impingement under cross-flow conditions, SAE Technical Paper No. 2002-01-2664.
- [8] Ruiz, F., Chigier, N. 1985, The mechanics of high speed atomization, Int. Conference on Liquid and Spray Systems ICLASS, 1985.
- [9] Senda, J., Fujimoto, H., Kobayashi, M., Yamamoto, K., Enomoto, Y. 1995, Heat Transfer Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Wall, Transl. from Journal of MESJ, Vo1.29, No.10.
- [10] Sitkei, G.: Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek, Springer Verlag 1964.
- [11] Weclas, M., Ates, B., Vlachovic, V. 2003, Basic aspects of interaction between a high velocity Diesel jet and a highly porous medium (PM), 9th Int. Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2003.
- [12] Weclas, M., 2004, Strategy for intelligent Internal Combustion engine with homogeneous combustion in cylinder, Sonderdruck Schriftenreihe Fachhochschule Nürnberg, Nr. 26.
- [13] Weclas, M., 2005, Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engines, Academic Press, Univ. of Applied Sciences, Nr. 32.
- [14] Weclas, M., 2005, Porous media in internal combustion engines, [in:] Cellular Ceramics-Structure, Manufacturing, Properties and Applications, Scheffler, M., Colombo, P. (eds), Wiley-VCH-Publ. (May, 2005)
- [15] Weclas, M. 2006, High velocity CR Diesel jet impingement on to porous structure and its utilization for mixture homogenization in I.C. engines, DITICE Workshop: Drop/wall interaction: Industrial applications, Experiments and Modeling, Bergamo (Italy).
- [16] Weclas, M., Zimmermann, R., Can circular Diesel jet have a triangular splashing region by impingement on the flat wall?, Submitted for publication in Journal of Fluids Engineering (in review).

Thermo- and fluid dynamic model of a multiphase screw pump, operating at very high gas volume fractions

Dipl.-Ing. (FH) Klaus Rübiger
Prof. Dr. T.M.A. Maksoud
Prof. Dr. John Ward

University of Glamorgan
School of Technology
Wales, UK

Prof. Dr. G. Hausmann

Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg
Fachbereich Maschinenbau und
Versorgungstechnik

Abstract

To describe the performance as well as the thermodynamic behaviour of a multiphase screw pump, also operating at very high gas volume fractions up to 100 %, a new thermo- and fluid dynamic model was developed. The model, which will be presented in this paper, takes the time-dependent gas-liquid heat transfer, the compressibility and acceleration effects of the multiphase gap flow as well as the possibility of critical flow conditions into account. For the simulation of the mutual phase heat transfer, the solution of the gap flow conservation equations and the optimisation of the gap inflow velocity, different numerical techniques were used. The model as such gives important information of the pressure and the temperature distribution, the multiphase leakage flows through the chamber connecting gaps as well as the effective flow rate or the volumetric efficiency of the pump near the conveyance break-off at very high gas volume fractions.

Key words : screw pump - multiphase - gas volume fraction

1. Introduction

A screw pump is a particular type of rotary displacement pumps, in which a number of screws rotate inside a cylindrical housing. The geometry and rotation of the screws generate a series of closed chambers, which transport the fluid from the low pressure inlet to the high pressure outlet. The pressure distribution through the pump and hence the flow characteristics and system performance is heavily influenced by the leakage flow from the discharge side to the suction side. This leakage flow occurs through three different gaps inside the screw pump, namely the perimeter gap between the screws and the housing, and the radial and flank gap between the mating surfaces of the screws, see Figure 1.1.

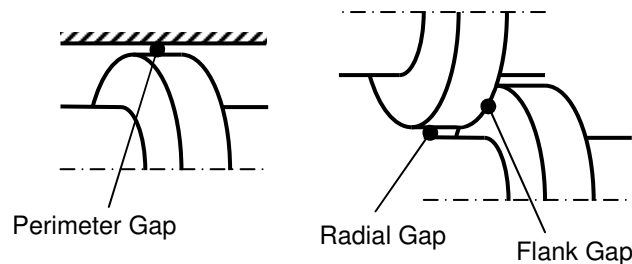


Figure 1.1 : Three different kind of gaps inside the screw pump

Previous investigations of multiphase screw pumps have largely been concerned with the general pumping behaviour of these systems [1]. Moreover these studies have been restricted to relatively medium sized pumps, in which the maximum power consumption and gas concentrations are relatively modest. In these situations the heat capacity and density of the gas-liquid mixture is dominated by the liquid phase so that the pumping process is essentially isothermal and thermodynamic effects can be neglected [2] and [3]. However, this assumption cannot be justified for larger, more powerful screw pumps, which are capable of conveying two-phase fluids with very high concentrations of the gaseous phase up to 100 %. There are existing two new models [4] and [5], which include the thermodynamic effects by establishing mass and energy balance equations for each chamber. But no multiphase screw pump model can be found in literature, which deals with the compressibility or the critical flow condition of the two-phase leakage flow through the gaps. Due to the above-mentioned lack of the correct modelling of compressibility effects, acceleration pressure drops and critical flow conditions, it is necessary to create a model for compressible gap flows inside of multiphase screw pumps, using analytical and numerical methods, to predict the leakage flow and the thermal behaviour more accurately.

2. Chamber model of the screw pump

The thermodynamic screw pump model can be treated as a collection of several chambers, which are connected by three different kinds of gaps. Due to the nature of a positive displacement pump - except for the leakage amount, the theoretical volume flow is constant at all times - only the leakage flow has to be investigated, to determine the real volume flow or the volumetric efficiency factor. The driving forces for leakage are the local pressure difference between two corresponding chambers and the rotating screws. Because of the rotation of the screws, the chambers are transported from the suction to the discharge side of the pump. In a real screw pump, the leakage flow increases the pressure in all the chambers incrementally from the inlet to the outlet. In the case of 100 % liquid phase, the pressure distribution is linear, because the fluid is incompressible and a certain amount of leakage at the pump outlet must have the same amount of leakage, which flows out at the pump inlet. But if the gas volume fraction increases and the chambers are allowed to have different gas volume fractions, the pressure profile becomes non-linear. The shape depends mainly on the gas volume fraction and the rotational speed of the screws. To determine the correct pressure and temperature profiles etc. along the screw axis, the chamber inflow and outflow process have to be investigated for all chambers, beginning at the pump discharge side. The correct chamber connection between the suction (S) and the discharge (D) of a double-flight twin screw pump through the perimeter gap (PG) and the radial gap (RG) is shown in Figure 2.1. As a consequence of the minor contribution of the flank gap to the whole leakage mass flow, the flank gap was not considered in the current model.

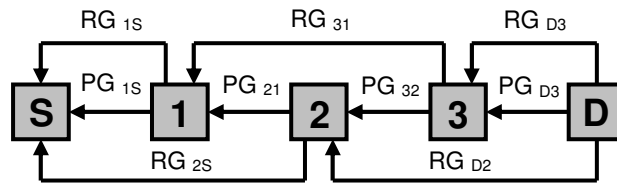


Figure 2.1 : Chamber connection scheme of a double-flight twin screw pump (here with 3 chambers)

The investigation time, which is divided into small time steps, is equal to the life time of the chambers. After this period, all chambers move one chamber position in the outlet direction. This means, that the former last chamber No. 3 have opened to the high pressure side and there is now a complete new chamber No. 1. The iteration of chamber changes, which includes all sub-iterations, has to be carried out so long, until all thermodynamic chamber variables reach a steady state. In the case of an odd number of chambers, the real pumping behaviour has to be determined by a weighting procedure between the next even upper and lower chamber number, depending on their temporal occurrence. The calculation of the thermodynamic conditions of a single chamber can be splitted into the following working stages, see also Figure 2.2:

- a) **Gas inflow** (constant specific total enthalpy)
- b) **Liquid inflow** (constant specific total enthalpy)
- c) **Gas compression by liquid inflow** (gas temperature increasing)
- d) **Liquid outflow** (variable specific total enthalpy)
- e) **Gas expansion by liquid outflow** (gas temperature decreasing)
- f) **Gas outflow** (variable specific total enthalpy)
- g) **Gas-liquid heat transfer** (through the interfacial area)

The chamber conditions of both phases and also the volume fractions, after the inflow (intermediate stage) and after the outflow process (final stage) are calculated iteratively. The division of the total inflow and outflow process into small time steps assures a nearly continuous flow through all chambers.

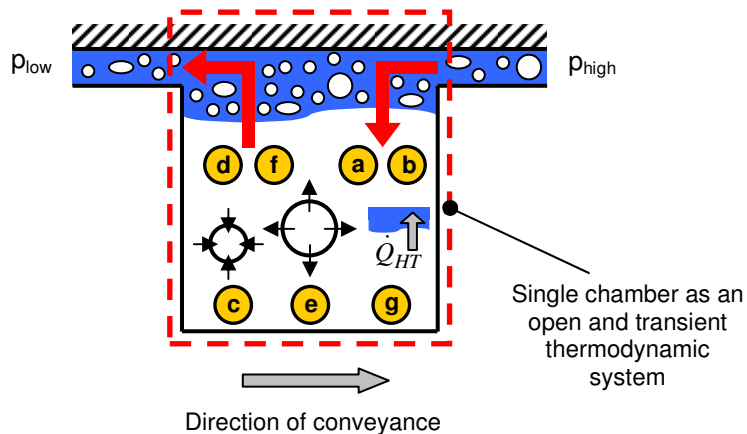


Figure 2.2 : Open and transient thermodynamic system

3. Fundamental thermodynamic equations for open systems

Each chamber of the screw pump was modelled as a thermodynamic open system [6] and [7], whereas the inflow and the escape of single or two-phase fluid from one chamber to the other are considered as transient processes. To describe the thermodynamic changes of the chamber condition, mass and energy conservation equations have to be applied, which were derived and introduced in this and the next sections.

$$Q_{12} + W_{12} = E_{total,2} - E_{total,1} \quad \text{First law of thermodyn.} \quad (3.1)$$

$$E_{total} = U + E_{kin} + E_{pot} \quad \text{Total energy} \quad (3.2)$$

$$U = U_{cha} + \Delta m_{in/out} \cdot u_{in/out} \quad \text{Internal energy} \quad (3.3)$$

$$E_{kin} = E_{kin,cha} + \Delta m_{in/out} \cdot \frac{w_{in/out}^2}{2} \quad \text{Kinetic energy} \quad (3.4)$$

$$E_{pot} = E_{pot,cha} + \Delta m_{in/out} \cdot g \cdot z_{in/out} \quad \text{Potential energy} \quad (3.5)$$

$$W_{12} = W_{tech,12} + p_{in} \cdot v_{in} \cdot \Delta m_{in} - p_{out} \cdot v_{out} \cdot \Delta m_{out} \quad \text{System work} \quad (3.6)$$

The energy conservation equation follows from the first law of thermodynamics for transient processes in open systems for a negligible kinetic and potential energy of the chamber itself to

$$\begin{aligned} m_{cha,2} \cdot u_{cha,2} - m_{cha,1} \cdot u_{cha,1} &= Q_{12} + W_{tech,12} \\ + \left(h_{in} + \frac{w_{in}^2}{2} + g \cdot z_{in} \right) \cdot \Delta m_{in} &- \left(h_{out} + \frac{w_{out}^2}{2} + g \cdot z_{out} \right) \cdot \Delta m_{out} \end{aligned} \quad (3.7)$$

The heat transfer and the technical work concerning the chambers were not implemented in the current adiabatic model stage for the simulation of non-decreasing chamber volumes. Nevertheless, both contributions were introduced here for completeness and to enable a future implementation. The time span for determining the different mass flows in and out of the chamber has to be chosen sufficiently small, in the following example to 0.2 ms, so that the final pressure and temperature distribution become almost independent of any further time reduction of each sub-iteration and has to be adapted in certain circumstances, depending on the operating point of the screw pump.

4. Chamber inflow process

The chamber inflow process consists of the inflow of the gaseous phase, then the inflow of the liquid phase - both at constant specific total enthalpy - and finally the gas compression by the increased liquid volume. At any stage, both fluids are sharing the same pressure value and during the inflow, the multiphase fluid is not able to flow out of the chamber. Furthermore, the process can be assumed as adiabatic, with no applied work energy from outside and a negligible difference in potential energy. The chamber inflow is mathematically described below in a sequential manner.

• Formulas for the chamber inflow

$$m_{cha,2} \cdot u_{cha,2} - m_{cha,1} \cdot u_{cha,1} = \left(h_{in} + \frac{w_{in}^2}{2} \right) \cdot \Delta m_{in} \quad (4.1)$$

$$m_{cha,2} = m_{cha,1} + \Delta m_{in} \quad \text{conservation of mass} \quad (4.2)$$

$$\left(h_{in} + \frac{w_{in}^2}{2} \right) = e = \text{const.} \quad \text{constant total spec. enthalpy} \quad (4.3)$$

$$\frac{m_{cha,2}}{m_{cha,1}} = \frac{e - u_{cha,1}}{e - u_{cha,2}} \quad \text{chamber inflow equation} \quad (4.4)$$

• Gas inflow

$$\frac{m_{cha,G,2}}{m_{cha,G,1}} = \frac{c_{p,G} \cdot T_{in} + \frac{w_{in}^2}{2} - c_{v,G} \cdot T_{cha,G,1}}{c_{p,G} \cdot T_{in} + \frac{w_{in}^2}{2} - c_{v,G} \cdot T_{cha,G,2}} \quad \text{resulting in } T_{cha,G,2} \quad (4.5)$$

$$\frac{m_{cha,G,2}}{m_{cha,G,1}} = \frac{p_{cha,2} \cdot T_{cha,G,1}}{p_{cha,1} \cdot T_{cha,G,2}} \quad \text{resulting in } p_{cha,2} \quad (4.6)$$

• Liquid inflow

$$\frac{m_{cha,L,2}}{m_{cha,L,1}} = \frac{T_{in} + \frac{w_{in}^2}{2 \cdot c_L} - T_{cha,L,1}}{T_{in} + \frac{w_{in}^2}{2 \cdot c_L} - T_{cha,L,2}} \quad \text{resulting in } T_{cha,L,2} \quad (4.7)$$

• Gas compression by liquid inflow

$$V_{cha,G,1} = \alpha_{cha,2} \cdot V_{cha} + \frac{\Delta m_{in,L}}{\rho_L} \quad \text{gas volume - before} \quad (4.8)$$

$$V_{cha,G,2} = \alpha_{cha,2} \cdot V_{cha} \quad \text{gas volume - after} \quad (4.9)$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_{cha,G,1}}{V_{cha,G,2}} \right)^\kappa \quad \text{isentropic change of pressure} \quad (4.10)$$

$$T_{G,2} = T_{G,1} \cdot \left(\frac{V_{cha,G,1}}{V_{cha,G,2}} \right)^{(\kappa-1)} \quad \text{isentropic change of temp.} \quad (4.11)$$

5. Chamber outflow process

The chamber outflow process consists of the outflow of the liquid phase at variable specific total enthalpy, then the gas expansion by the decreasing liquid volume and finally the gas outflow also at variable specific total enthalpy. As in the case for inflow process, both fluids are sharing the same pressure value and during the outflow, multiphase fluid is not able to flow into the chamber. Furthermore, the process can also be assumed as adiabatic, with no applied work energy from outside and a negligible difference in potential energy. The chamber outflow is mathematically described below also in a sequential manner.

• Formulas for the chamber outflow

$$m_{cha,1} \cdot u_{cha,1} - m_{cha,2} \cdot u_{cha,2} = \left(h_{out} + \frac{w_{out}^2}{2} \right) \cdot \Delta m_{out} \quad (5.1)$$

$$m_{cha,1} - m_{cha,2} = \Delta m_{out} \quad \text{conservation of mass} \quad (5.2)$$

$$\left(h_{out} + \frac{w_{out}^2}{2} \right) = e \neq const. \quad \text{not constant total spec. enthalpy} \quad (5.3)$$

$$\frac{dm_{cha}}{m_{cha}} = \frac{du_{cha}}{h_{out} + \frac{w_{out}^2}{2} - u_{cha}} \quad \text{chamber outflow equation} \quad (5.4)$$

• Liquid outflow

$$T_{cha,L,2} = T_{cha,L,1} + \frac{w_{out}^2}{2 \cdot c_{v,L}} \cdot \ln \left(\frac{m_{cha,L,2}}{m_{cha,L,1}} \right) \quad (5.5)$$

• Gas expansion by liquid outflow

$$V_{cha,G,1} = \alpha_{cha,2} \cdot V_{cha} - \frac{\Delta m_{out,L}}{\rho_L} \quad \text{gas volume - before} \quad (5.6)$$

$$V_{cha,G,2} = \alpha_{cha,2} \cdot V_{cha} \quad \text{gas volume - after} \quad (5.7)$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_{cha,G,1}}{V_{cha,G,2}} \right)^\kappa \quad \text{isentropic change of pressure} \quad (5.8)$$

$$T_{G,2} = T_{G,1} \cdot \left(\frac{V_{cha,G,1}}{V_{cha,G,2}} \right)^{(\kappa-1)} \quad \text{isentropic change of temp.} \quad (5.9)$$

• **Gas outflow**

$$\frac{m_{cha,G,2}}{m_{cha,G,1}} = \left(\frac{\frac{W_{out}^2}{2} + R \cdot T_{cha,G,2}}{\frac{W_{out}^2}{2} + R \cdot T_{cha,G,1}} \right)^{\left(\frac{1}{\kappa-1} \right)} \quad \text{resulting in} \quad T_{cha,G,2} \quad (5.10)$$

$$\frac{m_{cha,G,2}}{m_{cha,G,1}} = \frac{p_{cha,2} \cdot T_{cha,G,1}}{p_{cha,1} \cdot T_{cha,G,2}} \quad \text{resulting in} \quad p_{cha,2} \quad (5.11)$$

6. Gas-liquid heat transfer inside a single chamber

After the chamber inflow and outflow process, a time-dependent mutual heat transfer [6] through the interfacial area between remaining fractions of the liquid and gaseous phase lead to a partial temperature or energy balancing. Generally, the temperature of the gaseous phase will decrease and the liquid phase will be heated up. After defining a time span - the heat transfer duration is equal to a single time step - and the initial conditions for the temperatures of the liquid and the gaseous phase, a system of ordinary differential equations has to be solved. The heat fluxes for both phases as well as the heat transfer flux through the interfacial area can be defined as

$$\dot{Q}_L = m_L \cdot c_L \cdot \frac{dT_L}{dt} \quad \text{Heat flux of the liquid phase} \quad (6.1)$$

$$\dot{Q}_G = m_G \cdot c_{p,G} \cdot \frac{dT_G}{dt} \quad \text{Heat flux of the gaseous phase} \quad (6.2)$$

$$\dot{Q}_{HT} = h_{HT} \cdot A_{HT} \cdot (T_G - T_L) \quad \text{Heat transfer flux through the interfacial area} \quad (6.3)$$

The system of ordinary differential equations, which results from the equating of Equations (6.1) and (6.2) with Equation (6.3), has the following form:

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{h_{HT} \cdot A_{HT}}{m_L \cdot c_L} \cdot (T_G - T_L) \quad (6.4)$$

$$\frac{dT_G}{dt} = \frac{h_{HT} \cdot A_{HT}}{m_G \cdot c_{p,G}} \cdot (T_L - T_G) \quad (6.5)$$

The greatest problems in determining the mutual heat transfer and thus the temperature of both phases as a function of time is the correct definition of the heat transfer coefficient and the interfacial area. The latter depends mainly on the kind of the current multiphase flow pattern inside the chamber, which can develop

from a simple stratified flow to highly dispersed liquid drops in the gaseous phase. Therefore, a correlation must still be found, which takes the different flow patterns and the corresponding heat transfer coefficients into consideration. Because of the present lack of knowledge concerning the mutual phase heat transfer coefficients and the interfacial area, the product of both parameters was chosen in a way, that the total heat balance was reached during a single time step, so that both phase temperatures will be identical at the end of the heat transfer. The Figure 6.1 shows the time-dependent phase temperatures during the mutual heat transfer process inside the last chamber near by the discharge port.

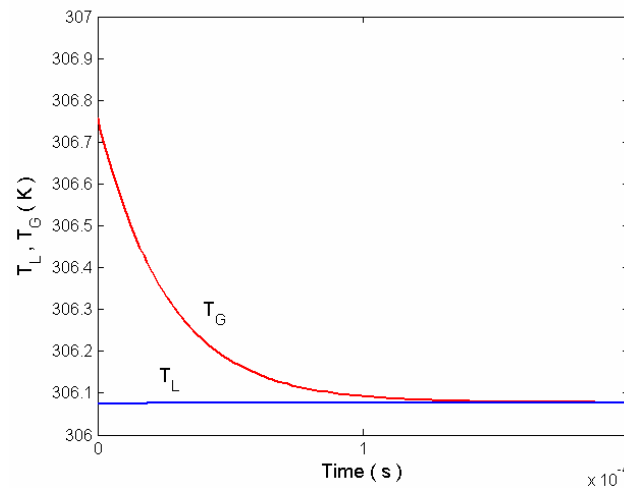


Figure 6.1 : Time-dependent heat transfer between the liquid and gaseous phase

7. The multiphase pressure-driven gap flows

• The perimeter and radial gap

The perimeter gap, shown in the left hand side of Figure 7.1 and in Figure 1.1, is the distance between the outer screw diameter and the inner diameter of the housing and it connects two chambers back-to-back. Because of the large outer screw diameter compared with the absolute gap height, the curvature of the gap can be neglected, so that it can be treated as a rectangular clearance. The radial gap, shown in the right hand side of Figure 7.1 as well as in Figure 1.1, is the space between the outer and the inner radius of the screws. Dependent upon the number of flights, it connects two chambers back-to-back or one chamber with the next but one. The basic theory of the perimeter gap is also valid for the radial gap. Only the geometric boundary conditions are different.

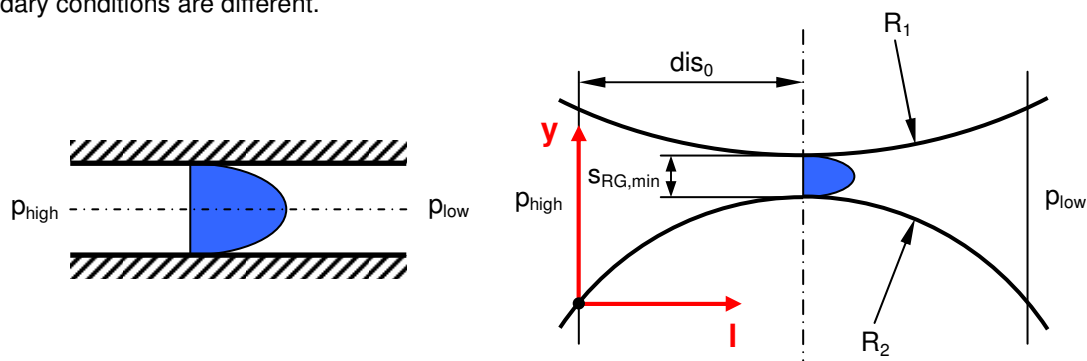


Figure 7.1 : The compressible pressure-driven flow inside the perimeter gap (left) and the radial gap (right)

To change the former incompressible single-phase equations into a compressible gap flow formulation, the Homogeneous Equilibrium Model [9], [10] and [11] for multiphase flows, where both phases have the same pressure, velocity, and temperature at an arbitrary position of the gap, was used. The steady state conservation equations - adiabatic flow with a negligible change of potential energy - for a constant or also variable gap height along the flow path follow to:

$$\frac{\partial(\rho_H \cdot w \cdot s)}{\partial l} = 0 \quad \text{Conservation of mass} \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial l} + \frac{1}{s} \cdot \frac{\partial(\rho_H \cdot w^2 \cdot s)}{\partial l} + \lambda \cdot \frac{\rho_H}{4 \cdot s} \cdot w^2 = 0 \quad \text{Conservation of momentum} \quad (7.2)$$

$$\frac{dT}{dl} + \frac{1}{c_{p,H}} \cdot w \cdot \frac{dw}{dl} = 0 \quad \text{Conservation of energy} \quad (7.3)$$

The friction factor in Equation (7.2) was defined for laminar and rough turbulent flows, depending on the according Reynolds number inside the perimeter or radial gap. To define the mass fraction or the homogeneous density of the fluid at the gap inlet, a new correlation was developed, which relates the gas volume fraction at the suction side (global GVF) of the screw pump to the GVF at the corresponding gap inlet. The correlation presents a smooth transition from a liquid single phase leakage flow, which still exists at a global GVF of approx. 85 %, to a purely gaseous backflow at a global GVF of 100 %.

• Solution of the conservation equations as a system of ordinary differential equations

For a convenient solution of the ODE system, the conservation equations were transformed into a matrix formulation, see also Equations (7.4) to (7.7), and afterwards solved by a fourth-order Runge-Kutta scheme. All primitive variables are solved simultaneously from the gap inlet step-wise to the gap outlet.

$$\mathbf{A} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial l} = \mathbf{b} \quad (7.4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{x \cdot R \cdot T \cdot w \cdot \rho_H^2}{p^2} & \rho_H & -\frac{x \cdot R \cdot w \cdot \rho_H^2}{p} \\ 1 & \rho_H \cdot w & 0 \\ 0 & w & c_{p,H} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} p \\ w \\ T \end{bmatrix} \quad (7.6) \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} -\frac{ds}{dl} \cdot \rho_H \cdot w / s \\ -\lambda \cdot \rho_H \cdot w^2 / (4 \cdot s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

The following Figures 7.2 and 7.3 present exemplary distributions of the three primitive variables pressure, mean velocity and temperature as well as the distributions of the coefficient matrix determinant firstly for the perimeter gap and secondly for the radial gap.

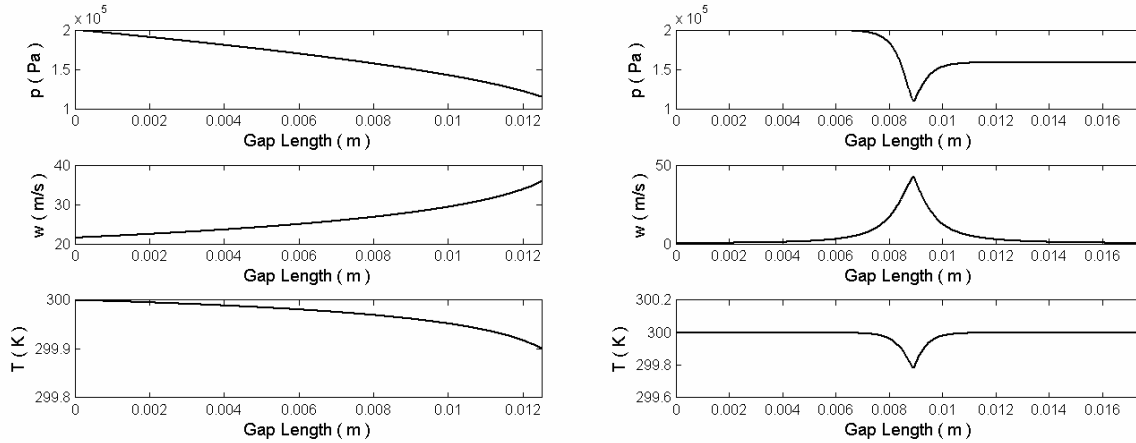


Figure 7.2 : Distributions of the primitive variables inside the perimeter gap (left) and the radial gap (right)

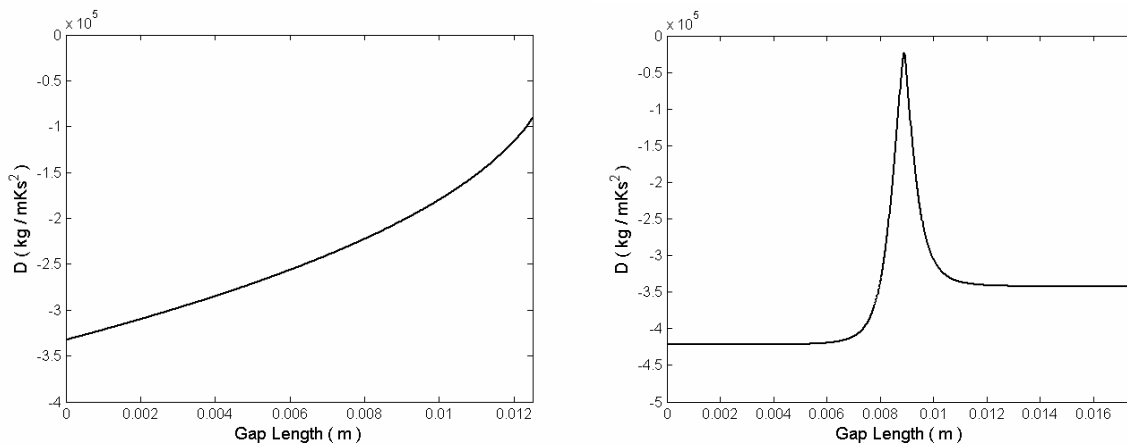


Figure 7.3 : Distributions of the coefficient matrix determinants inside the perimeter gap (left) and the radial gap (right)

The advantage of this matrix formulation is the fact that the coefficient or the left-hand side matrix **A** of the system of conservation equations serves as an indicator for the critical flow condition. If the gap flow reaches anywhere the critical speed, the pressure gradient will be infinite at this location. Simultaneously, the determinant of matrix **A** will become zero. Therefore, the inlet velocity must be increased step by step until the determinant of the coefficient matrix will be zero, then the critical mass flux density is determined. The perimeter gap and the radial gap are both affected by this critical flow effects. For the screw pump model it will be assumed, that the critical speed or the critical pressure is reached at the perimeter gap outlet or the radial gap nip region.

8. Optimisation or adjustment of the gap inflow velocity

In the case of the compressible perimeter and radial gap flow, the application of boundary conditions at the gap inlet and outlet is not possible. In the one-dimensional incompressible case, the mean velocity can be determined by the gap pressure difference and the friction factor. In the compressible case however, only boundary conditions at the inlet could be applied. In contrast to the thermodynamic variables inlet pressure and temperature, the inlet velocity is unknown. But there is an additional variable, which is known: the outlet pressure or the pressure of the next chamber. Therefore, it is possible to estimate an inlet velocity and calculate the corresponding outlet pressure and iterate the process until the calculated outlet pressure is equal to the pressure of the next chamber. To make this iteration process faster and more efficiently, an optimisation process, see Figure 8.1, is used.

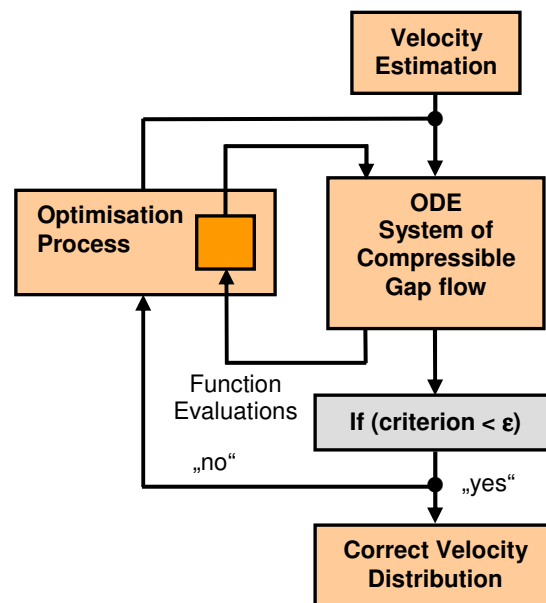


Figure 8.1 : Scheme of inflow velocity adjustment

The optimisation algorithms, which are used to optimise a system or to minimise a criterion, depend on the kind of system equations (linear or non-linear) and on restrictions for the optimisation variables. Very popular and also efficient algorithms are the Quasi-Newton method (Fletcher, Powell) for non-restrictive optimisation problems and the Sequential Quadratic Programming (Powell, Schittkowski) for more complex and restrictive problems, which are both available in the mathematical programme system MATLAB. An advantage of the Quasi-Newton method is the insensitivity towards initial conditions for the optimisation variables, which are located far away from the minimum. This is the reason, that this method is often preferred for global optimisation problems.

The optimisation variable is the inflow velocity w_0 , for which additional informations like initial conditions, upper and lower bounds have to be defined. The optimisation criterion, which has to be minimised, is the difference between the calculated outlet pressure and the actual pressure in the next chamber:

$$f_{crit} = |p_{outlet} - p_{cha,real}| \quad (8.1)$$

But for critical compressible flows, it must be considered, that the pressure difference criterion is not valid anymore, if the critical mass flux is reached. A further pressure reduction will not cause an increase of the inlet velocity, so that the velocity has to be fixed, if the determinant of the coefficient matrix decreases to zero at the perimeter gap outlet or the radial gap nip region.

9. Results of the screw pump simulation

The following exemplary multiphase screw pump simulation investigates an arbitrary operating point with an overall differential pressure of 10 bar, a global gas volume fraction of 96 % and a rotational speed of 2900 rpm. This rotational period is characterised by three closed chambers between the discharge and the suction side, in contrast to two closed chambers during the rest of a single rotation. The inflow temperature at the suction side was set to 300 K for both phases. The most important geometric parameters of the screw pump can be taken from Table 9.1.

Description	Symbol	Value	Unit
Outer screw diameter	D	100	mm
Inner screw diameter	d	70	mm
Thread pitch	h	50	mm
Screw length	l_s	120	mm
Number of flights	N	2	---
Chamber volume	V_{cha}	44	cm ³
Perimeter gap height	s_{PG}	188	μm
Min. radial gap height	s_{RG}	105	μm

Table 9.1: Important geometric parameters

The pressure distribution inside the screw pump is presented by Figure 9.1. The horizontal steps indicate the homogeneous pressure field inside each chamber. Above a GVF of approx. 85 %, the pressure distribution is losing step by step the former parabolic shape, which had a large pressure gradient near by discharge side. At a GVF of 96 %, the leakage flow is already characterised by two phases and has a decreasing density and viscosity, so that the sealing behaviour is also decreasing. As the backflow increase, the pressure rises in each chamber and the pressure profile returns to linearity.

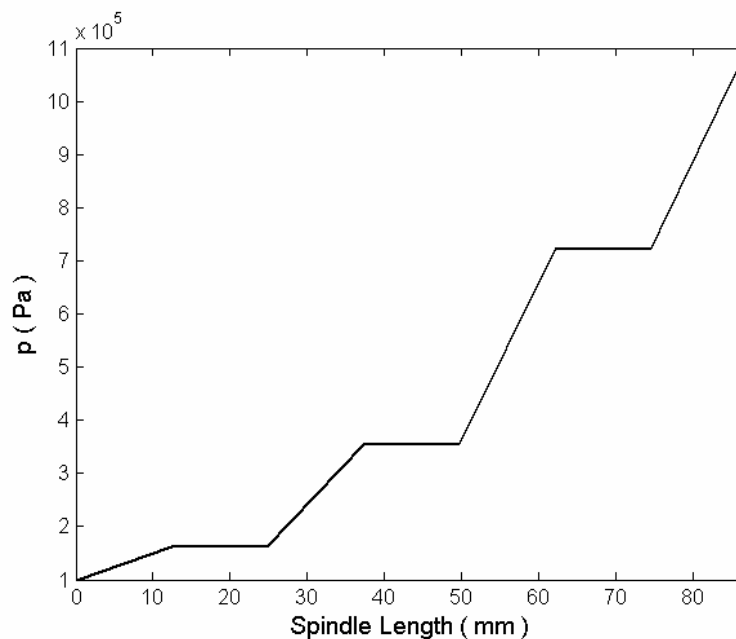


Figure 9.1 : Pressure distribution inside the screw pump

Figure 9.2 and 9.3 are showing the thermodynamic behaviour of the liquid and the gaseous phase between the suction and the discharge port. The largest gradient at this high GVF is occurring between the suction side and the first chamber, because of the backflow of already heated fluid from the discharge into the different chambers. At the moment, where the last chamber opens to the discharge port, the remaining gas phase is compressed by the fast expanding fluid of the discharge, so that the gas temperature will be increased again, before the chamber content is released to the high pressure side.

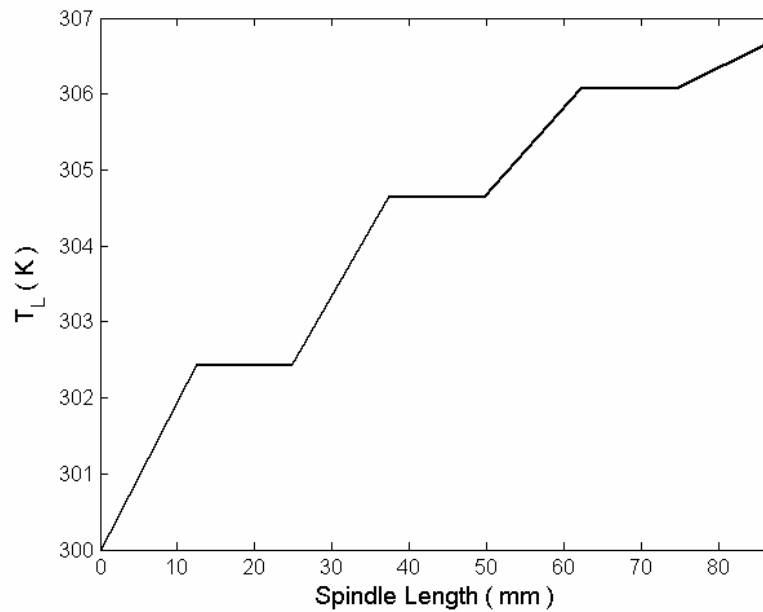


Figure 9.2 : Liquid temperature distribution inside the screw pump

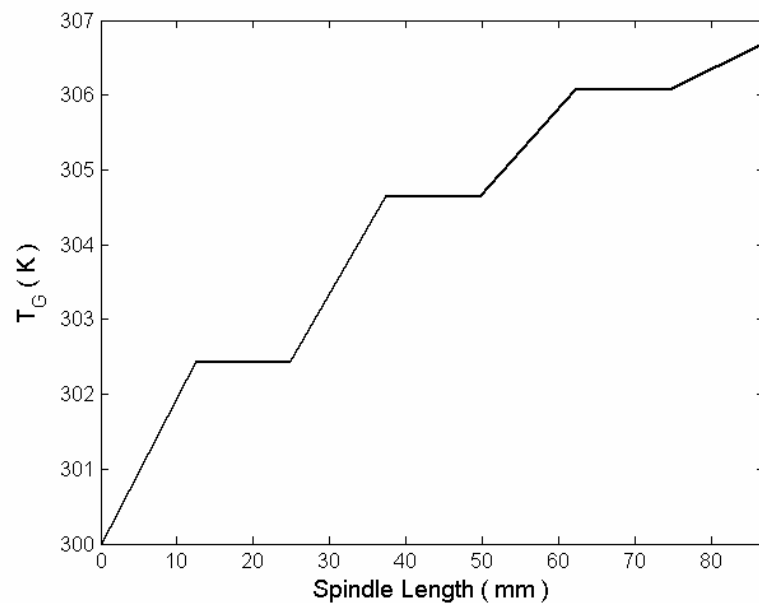


Figure 9.3 : Gas temperature distribution inside the screw pump

The gas densities as well as the gas volume fractions in each chamber are presented by the two following Figures 9.4 and 9.5. The gas densities are simply determined by the chamber pressure, the gas temperature and the use of the equation of state for air as an ideal gas. While the gas densities are increasing along the conveyance direction, the GVF's are decreasing because of the backflow of the liquid phase and the resulting compression of the gaseous phase.

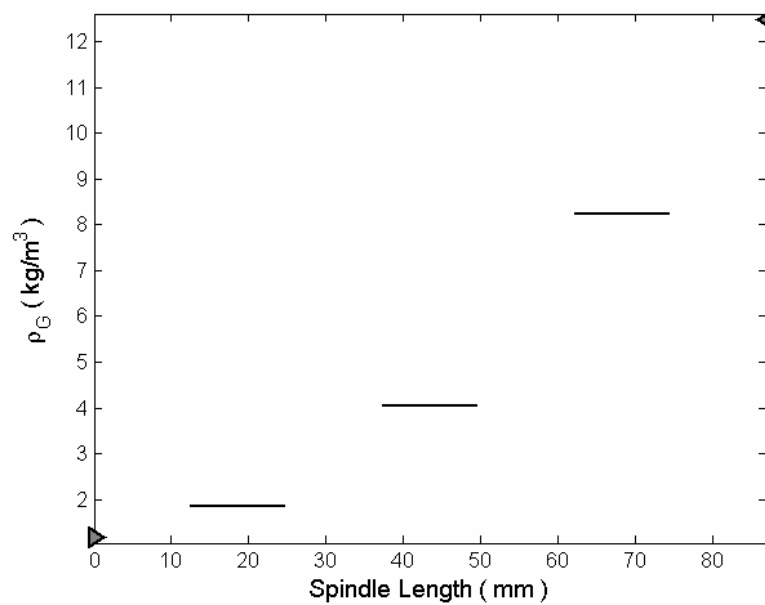


Figure 9.4 : Chamber gas densities inside the screw pump

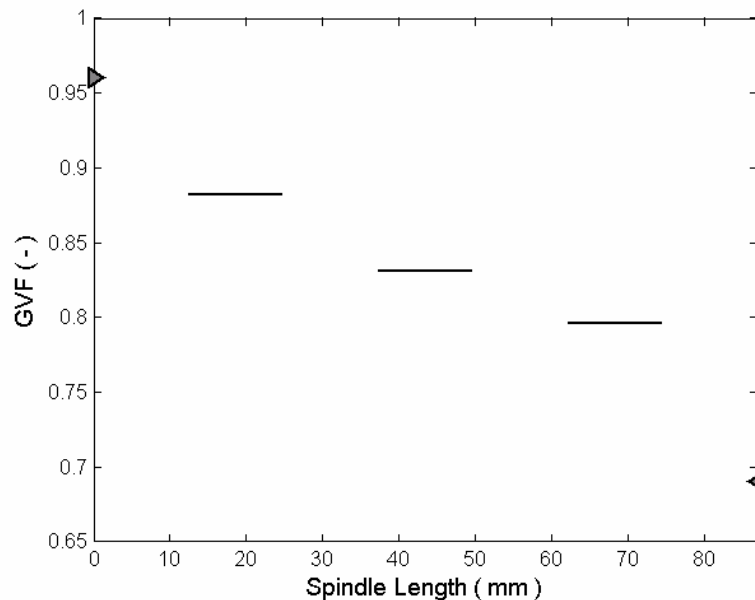


Figure 9.5 : Chamber GVF's inside the screw pump

Figure 9.6 shows the convergence of the volumetric efficiency as a function of chamber changes. After approx. 60 chamber iteration loops or 30 spindle rotations, a steady state is reached. Figure 9.7 presents the residual histories of the chamber pressure and both phase temperatures for the last chamber near by the discharge port as an example. The residuals are the differences of a certain variable between two consecutive chamber changes and have to decrease in time in order to obtain good convergence behaviour. The chamber pressure converges after only 7 iterations, whereas both temperatures converge after 45 chamber changes.

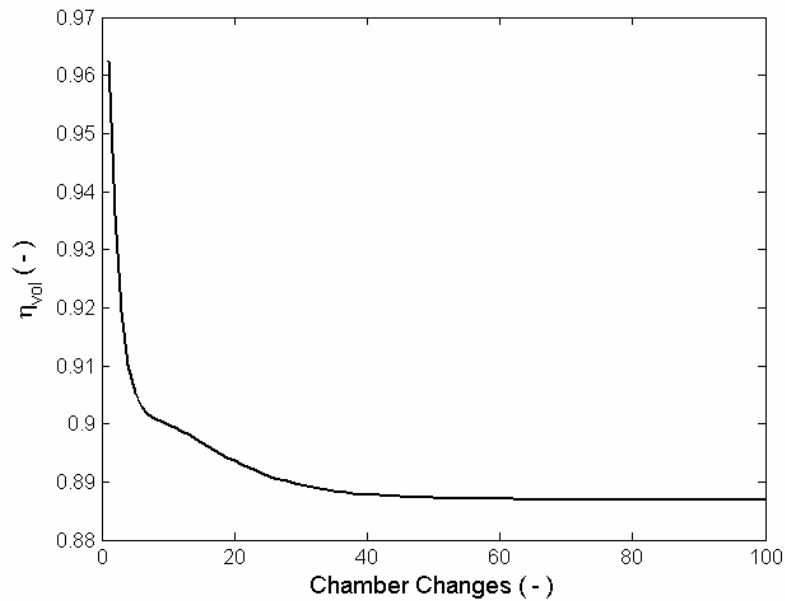


Figure 9.6 : Convergence history of the volumetric efficiency

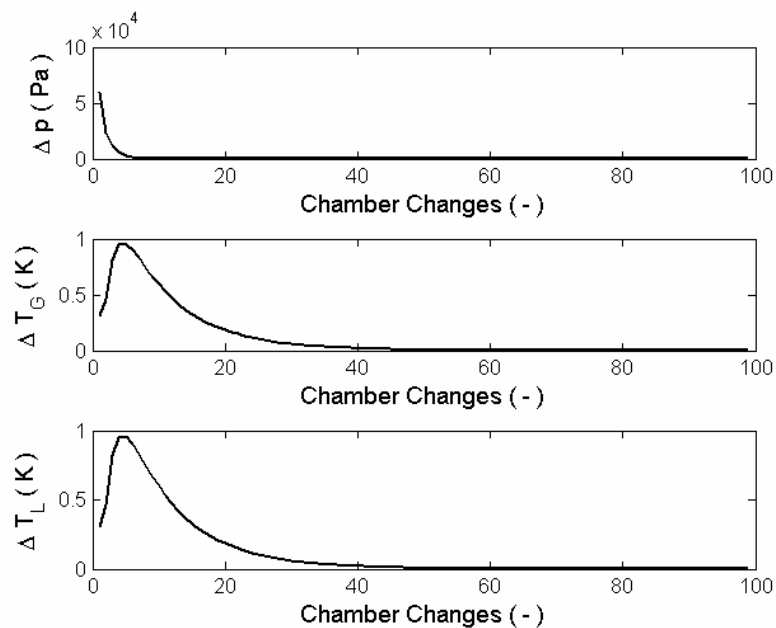


Figure 9.7 : Residual histories of the pressure and phase temperatures of the last chamber

The volumetric efficiency during a conveyance period of three closed chamber is equal to 88.7 %, which can be also seen by the steady state in Figure 9.6. Weighting both numbers of existing chambers to calculate the real leakage volume flow, will result in an integral real volume flow of 39.4 m³/h. Considering the theoretical volume flow of 61.2 m³/h, this would correspond to a final volumetric efficiency of 64.4 %.

10. Conclusion

The presented multiphase screw pump model was developed for the prediction of the pump conveyance behaviour especially at very high gas volume fractions above 85 %. To satisfy also the physical requirements on a multiphase, an almost purely gaseous flow, and compressible leakage flow, a new multiphase gap flow sub-model was introduced. This model is able to take into account the compressibility and acceleration effects of the leakage flow. The model is also capable of dealing with an extreme condition of critical flow, which can occur in a gap between two chambers having a large difference of static pressure. The consideration of these effects allows a more precise simulation of the thermodynamic behaviour and pump characteristics at very high gas volume fractions up to the conveyance break-off.

Acknowledgements

The authors would like to thank the company LEISTRITZ for all the information about multiphase screw pumps and their additional technical support and also the Department of Mechanical and Utility Engineering of the University of Applied Sciences in Nuremberg for the computational assistance and facilities.

Nomenclature

General symbols

A	area (general)
c	specific heat capacity
d	inner screw diameter
D	outer screw diameter , determinant
e	specific total enthalpy
E	energy (general)
f	criterion function
g	gravitational acceleration
h	specific enthalpy , heat transfer coefficient , thread pitch
H	enthalpy , height
l	length
m	mass
N	number of flights
p	static pressure
q	specific heat energy
Q	heat energy
R	individual gas constant , radius
s	gap height , specific entropy
t	time
T	temperature
u	specific internal energy
U	internal energy
v	specific volume
V	volume (general)
w	gap flow velocity
W	work energy
x	mass fraction
x,y,z	coordinate directions

Vectors / Matrices

A	coefficient matrix
b	right hand side vector
X	vector of primitive variables

Greek Letters

α	gas volume fraction
Δ	difference
ε	small criterion value
η	efficiency
κ	isentropic exponent
λ	friction factor
ρ	density

Subscripts

cha	chamber
crit	criterion
G	gaseous
h	hydraulic
H	homogeneous
HT	heat transfer
in	inflow
kin	kinetic
L	liquid
min	minimum
out	outflow
p	constant pressure
pot	potential
S	screw
tech	technical
v	constant volume
vol	volumetric
0	initial condition

Abbreviations

dis	distance
D	discharge
GVF	gas volume fraction
ODE	ordinary differential equation
PG	perimeter gap
RG	radial gap
S	suction

References

- [1] WINCEK, M.:
Zur Berechnung des Förderverhaltens von Schraubenspindelpumpen bei der Förderung von Flüssigkeits / Gas-Gemischen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1992
(*The calculation of the conveyance behaviour of screw pumps at the conveyance of liquid/gas-mixtures, Ph.D. thesis, University of Erlangen-Nuremberg, 1992*)
- [2] KÖRNER, H.:
Zum Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen für Zweiphasengemische hohen Gasgehalts, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1998
(*The conveyance behaviour of screw pumps for two-phase mixtures with high gas-volume-fractions, Ph.D. thesis, University of Erlangen-Nuremberg, 1998*)
- [3] ETZOLD, S.:
Verlustanalyse von Schraubenspindelpumpen bei Mehrphasenförderung, Dissertation, Universität Hannover, 1993
(*Leakage analysis of screw pumps during multiphase conveyance, Ph.D. thesis, University of Hanover, 1993*)
- [4] NAKASHIMA, C.Y. / OLIVEIRA, S. / CAETANO, E.F.:
Thermo-hydraulic model of a twin-screw multiphase pump, ASME IMECE 04, Anaheim, USA, 2004
- [5] RAUSCH, T. / VAUTH, T. / BRANDT, J.U. / MEWES, D.:
A model for the delivering characteristic of multiphase pumps, 4th North American Conference on Multiphase Technology, Banff, Canada, 2004
- [6] STEPHAN, K. / MAYINGER, F.:
Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen - Band 1 Einstoffsysteme, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, 1986
(*Thermodynamics - fundamentals and technical applications - vol. 1 single material systems*)
- [7] HAHNE, E.:
Technische Thermodynamik - Einführung und Anwendung, Addison-Wesley, Bonn, 1993
(*Technical thermodynamics - introduction and application*)
- [8] WAGNER, W.:
Wärmeübertragung, Vogel Verlag, Würzburg, 1998
(*Heat transfer*)
- [9] WALLIS, G.B.:
One-dimensional Two-phase Flow, McGraw Hill Inc., 1969
- [10] LEVY, S.:
Two-phase flow in complex systems, John Wiley & Sons, New York, 1999
- [11] MAYINGER, F.:
Strömung und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen, Springer-Verlag, Wien / New York, 1982
(*Flow and heat transfer in gas-liquid mixtures*)
- [12] BESTLE, D.:
Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, 1994
(*Analysis and optimization of multi-body systems*)
- [13] CORRADINI, M.L.:
Multiphase Flow : Gas/Liquid (*The Handbook of Fluid Dynamics*), ed. R. W. Johnson, CRC Press LLC / Springer-Verlag, Boca Raton / Heidelberg, 1998

Dynamic Analysis of the Dortmund University Campus Sky Train

Reinhold Meisinger

Mechanical Engineering Department
Nuremberg University of Applied Sciences
Kesslerplatz 12, 90121 Nuremberg, Germany

Abstract

The Sky Train at Dortmund University campus is a driverless transit system. Cabins suspended from the elevated guideway glide along towards to their destination. The vehicles can run on the double track route at one-minute intervalls with a nominal speed of 50 km/h. The guideway consists of box-shaped steel beams with a narrow slot on bottom. With its structure it forms the inside support wheel and guidance wheel tracks for the bogies. The passenger cabins hanging on the bogies are oscillating in lateral direction influenced by the periodic track irregularities. For different system parameters the response of the lateral cabin acceleration at the center of gravity is determined by frequency response analysis and computer simulation. It is shown that by optimizing the design parameters the passenger ride comfort in lateral direction can be improved enormously. Further improvement is possible only by active control.

The original version of the paper was presented on the Second International Conference on Dynamics, Vibration and Control, Beijing, P.R. China 2006.

1. Introduction

The Sky Train is an automatic guided transit system for passenger transport used in the university campus of Dortmund, cf. Boehm et al [1]. Depending on the number of customers, up to five vehicles can operate simultaneously on the double-track route in each direction. During off-peak hours they can operate on request: namely, a vehicle automatically starts moving when passengers request it and takes them to their individual destinations, cf. Rahier [2]. As shown in Fig. 1 the design of the guideway beams and the guidance system make a considerable contribution to the availability of the overall system. The box-shaped steel beams are entirely closed except for a narrow slot along the bottom. With its supporting structure it forms the inside tracks for support and guidance wheels on the bogies. The mechanism for the track switches and the conductor rails to supply electric power to the vehicles are also enclosed and therefore optimally protected against inclement weather even in snow and ice and accidental contact, cf. Siemens [2]. Each Sky Train vehicle consists of one or two passenger cabins, each hanging on two bogies. These driverless vehicles are moved by the automatic low-noise propulsion system with four solid-rubber tired support wheels per bogie at speeds up to 50 km/h. In vertical direction comfortable air suspensions on the top of the cabin ensure a pleasant ride comfort at higher speeds. However in lateral direction each cabin connected by joints with the bogies is oscillating influenced by the periodic irregularities of the support tracks. While significant information exists for the dynamic response in the vertical direction very little information exists on the dynamic response of the cabin acceleration in lateral direction, cf. Meisinger [4].

In this paper frequency response analysis is used to compute the resonance diagram of the lateral cabin center of gravity acceleration for the undamped system. For practical cases this is sufficient because the circular damping of the cabin is very small and at nominal speed the excitation frequency is very high compared with the natural frequency of the system. Simulation results with included relative circular damping between passenger cabin and bogie confirm this assumption. Because state space notation is used, for further investigations the computer simulation easily can be extended with an actively controlled passenger cabin.



Fig. 1: Sky Train at Dortmund University Campus, Germany

2. Mathematical Model of the Track

As shown in Fig. 2 and Fig. 3, the critical wave length of the track irregularities and the according amplitude are l and A respectively. Due to the distance between the two bogies is assumed to be $3 \cdot l$ and the distance between the axes is assumed to be l all left support wheels are following the track with $A \cdot \cos(\Omega \cdot t)$ while all right support wheels are following the track with $-A \cdot \cos(\Omega \cdot t)$. Because the bogies with the relevant dimensions a and b are assumed to be rigid, the lateral displacement of the bogie in the joint B can be computed as

$$y = A \cdot b/a \cdot \cos(\Omega \cdot t), \quad (1)$$

with the circular excitation frequency $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot v/l$, where v is the constant vehicle speed.

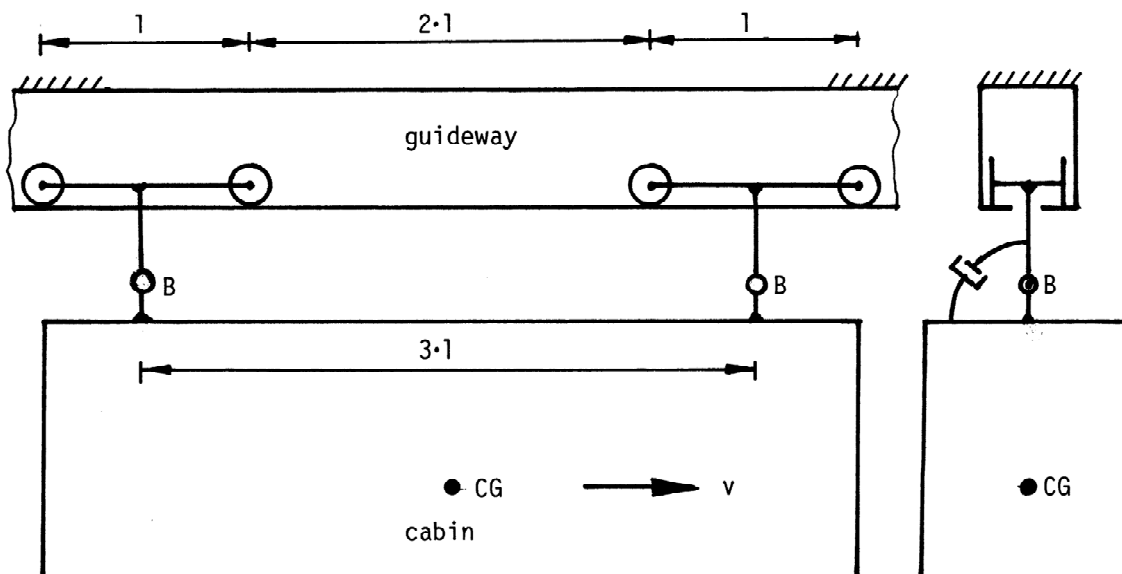


Fig. 2: Mathematical model of the Sky Train and the track

3. Mathematical Model of the Cabin

The cabin with mass m , center of gravity CG and moment of inertia J_C with respect to CG is connected with the bogie in joint B. The distance between cabin center of gravity CG and joint B is l_c , cf. Fig. 3. With the two degrees of freedom (DOF) φ and y_c , which are assumed to be small, the differential equation of motion without circular damping can be written as

$$J_C \cdot d^2\varphi/dt^2 + m \cdot l_c \cdot d^2y_c/dt^2 + m \cdot g \cdot l_c \cdot \varphi = 0. \quad (2)$$

With $y_c = y + \varphi \cdot l_c$ and with the moment of inertia $J_B = J_C + m \cdot l_c^2$ with respect to B another form of eq. (2) is

$$J_B \cdot d^2\varphi/dt^2 + m \cdot g \cdot l_c \cdot \varphi = - m \cdot l_c \cdot d^2y/dt^2. \quad (3)$$

Differential equation (3) will be directly used for the frequency response analysis of the undamped system.

With eq. (1) the amplitude of the lateral acceleration d^2y/dt^2 in the joint B is $\Omega^2 \cdot A \cdot b/a$. The according differential equation with included circular damping is given in eq. (8).

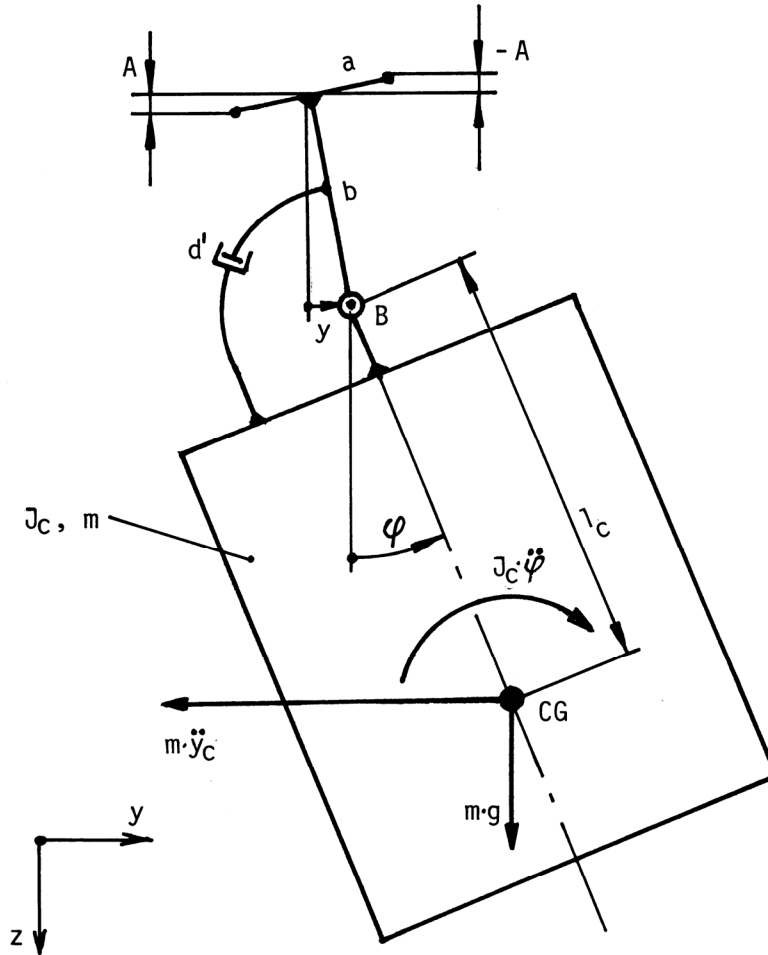


Fig. 3: Mathematical model of the passenger cabin

4. Frequency Response Analysis

With LAPLACE transformation of eq. (3) the complex transfer function

$$\varphi = \frac{-p^2 \cdot m \cdot l_c}{p^2 \cdot J_B + m \cdot g \cdot l_c} \cdot y \tag{4}$$

is obtained, where $p = j\Omega$. With $y_c = y + \varphi \cdot l_c$ the frequency response for the lateral center of gravity displacement y_c of the passenger cabin can be written as

$$y_c = \frac{m \cdot g \cdot l_c - J_c \cdot \Omega^2}{m \cdot g \cdot l_c - J_B \cdot \Omega^2} \cdot y \tag{5}$$

With the frequency ratio $\eta = \Omega/\omega_0$, where ω_0 is the natural circular frequency ($\omega_0^2 = m \cdot g \cdot l_c / J_B$) of the undamped passenger cabin, with eq.(5) the frequency response for the lateral center of gravity acceleration becomes

$$\frac{d^2 y_c / dt^2}{\Omega^2 \cdot A \cdot b / a} = \frac{1 - J_C / J_B \cdot \eta^2}{1 - \eta^2} \quad (6)$$

If the frequency ratio $\eta > 10$, eq. (6) can be simplified as

$$\frac{d^2 y_c / dt^2}{\Omega^2 \cdot A \cdot b / a} = \frac{J_C}{J_B} \quad (7)$$

From eq. (7) it can be seen, that small ratios J_C / J_B leads to small lateral accelerations of the cabin in CG.

5. Computer Simulation

If eq. (3) is extended by the circular damping the following cabin differential equation is obtained

$$J_B \cdot d^2 \varphi / dt^2 + d' \cdot d\varphi / dt + \omega_0^2 \cdot \varphi = d' \cdot d\beta / dt - m \cdot l_c \cdot d^2 y / dt^2, \quad (8)$$

where d' is the circular damping constant and $\beta = y/b$, cf. Fig. 3. The system will be extended by the differential equation for the periodic lateral excitation in joint B with the initial condition $y_0 = A \cdot b/a$.

$$d^2 y / dt^2 = -\Omega^2 \cdot y. \quad (9)$$

With $\omega_0^2 = m \cdot g \cdot l_c / J_B$ and the circular damping factor $D = d' / (2 \cdot J_B \cdot \omega_0)$ the two differential equations (8) and (9) can be written in state space notation

$$dx/dt = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}, \quad d^2 y_c / dt^2 = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}, \quad \mathbf{x}^T = [\varphi, d\varphi/dt, y, dy/dt], \quad y(0) = y_0, \quad (10)$$

where \mathbf{x} is the 4×1-state vector including the states of the cabin and the states of the periodic excitation, \mathbf{A} is the 4×4-system matrix and \mathbf{C} is the 1×4-output matrix with the following matrix elements

$$a_{12} = a_{34} = 1 \quad a_{21} = -\omega_0^2 \quad a_{22} = -2 \cdot D \cdot \omega_0 \quad a_{23} = \omega_0^2 \cdot \Omega^2 / g \quad a_{24} = 2 \cdot D \cdot \omega_0 / b \quad a_{43} = -\Omega^2$$

$$c_{11} = a_{21} \cdot l_c \quad c_{12} = a_{22} \cdot l_c \quad c_{13} = a_{23} \cdot l_c - \Omega^2 \quad c_{14} = a_{24} \cdot l_c$$

All other matrix elements in \mathbf{A} and \mathbf{C} are zero.

6. Numerical Results

With eq. (6) the resonance diagram without circular damping shown in Fig. 4 is plotted for different moment of inertia ratios J_C / J_B . This diagram includes two limiting cases: With $J_C / J_B = 0$ the cabin is a single mass, that means $J_C = 0$ and with $J_C / J_B = 1$ joint B is at the center of gravity CG, that means $l_c = 0$.

For the computer simulation the following system parameters are assumed, which are not equal but similar to the parameters of the real Sky Train.

cabin mass	$m = 5000 \text{ kg}$	cabin moment of inertia	$J_C = 10000 \text{ kgm}^2$	speed $v = 50 \text{ km/h}$
wave length	$l = 2 \text{ m}$	damping factor	$D = 0.2$	distance $l_c = 2 \text{ m}$
amplitude	$A = 0.001 \text{ m}$	bogie distances	$a = 0.2 \text{ m} ; b = 0.6 \text{ m}$	

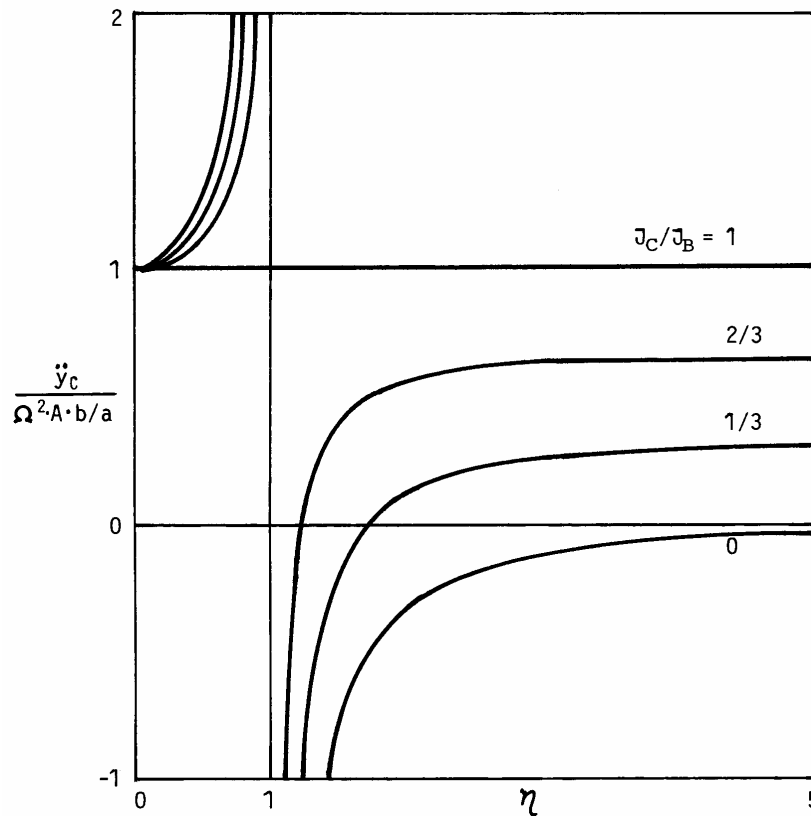


Fig. 4: Resonance diagram of lateral cabin acceleration without circular damping

Then the natural circular frequency ω_0 , the circular excitation frequency Ω , the frequency ratio η , the cabin moment of inertia J_B with respect to B and the initial condition y_0 are:

$$\omega_0 = 1.80 \text{ 1/s} \quad \Omega = 43.63 \text{ 1/s} \quad \eta = 24.22 \quad J_B = 30000 \text{ kgm}^2 \quad y_0 = 0.003 \text{ m}$$

With this system parameters the lateral acceleration in cabin center of gravity results in 1.9 m/s^2 , cf. Fig. 5. The same result is received from frequency response analysis in Fig. 4 with a moment of inertia ratio $J_C/J_B = 1/3$ and a lateral joint acceleration $\Omega^2 A \cdot b/a = 5.71 \text{ m/s}^2$.

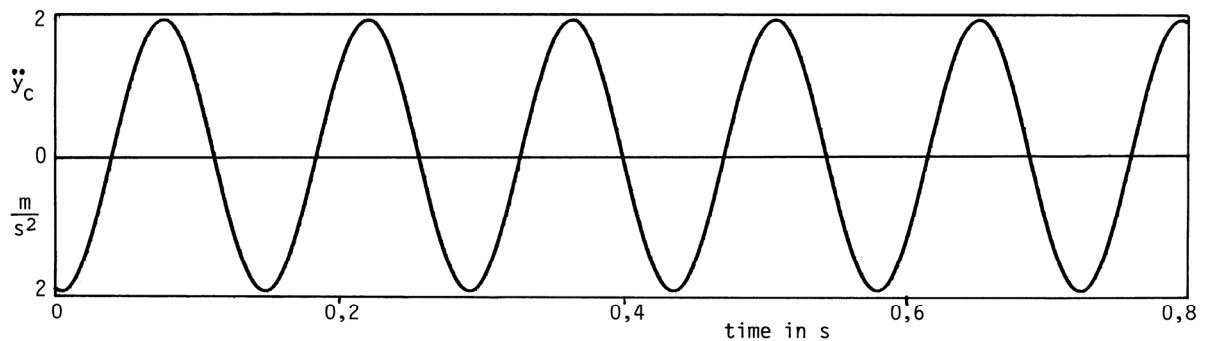


Fig. 5: Time histories of lateral cabin acceleration with circular damping factor $D = 0.2$

7. Conclusion

A basic analysis to determine the response of the lateral center of gravity acceleration of a Sky Train cabin on a guideway with periodic track irregularities has been developed. Studies have shown that the frequency response analysis for the undamped system is in very good agreement with simulation results for the system with circular damping when the exciting frequency is high compared with the natural frequency of the system. For the given system parameters and a travelling speed of 50 km/h the lateral acceleration in center of gravity of the cabin is 1.9 m/s^2 . If the bogie distance b is reduced to 0.1 m and the distance l_c is enlarged to 2.5 m (joint B is moved up 0.5 m) then a moment of inertia ratio $J_C/J_B = 0.242$ results. This gives a reduction of lateral acceleration to 0.23 m/s^2 . With this simple change of the design parameters the passenger ride comfort in lateral direction can be improved enormous. In further research an actively controlled cabin will be investigated.

REFERENCES

- [1] Boehm, E., Frisch, H., 1994, "The New Operating System of the H-Train in Dortmund", Verkehr und Technik, Band 47, Heft 10, S. 465-470.
- [2] Rahier, H.W., Scharf, P., 2002; "Sicherheitstechnische Prüfung der fahrerlosen Kabinenbahn des Flughafens Duesseldorf", Signal und Draht, Band 94, Heft 10, S. 20-22.
- [3] Siemens Transportation Systems, 1996; "The Sky Train at Duesseldorf International Airport" Turnkey Systems, Order No. A19100-V400-B557-X-7600.
- [4] Meisinger, R. , Analysis of the Lateral Dynamics of a Sky Train with Periodic Track Irregularities. Proc. of the Second International Conference on Dynamics, Vibration and Control, Beijing, P.R. China 2006.

Single Subject Research – ein Evaluierungsverfahren auch für die Soziale Arbeit ?

Bruni Vestner

Kreisjugendring Nürnberger Land
Waldluststraße 1
91207 Lauf

Werner Wüstendörfer

Fachbereich Sozialwesen
Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg
Bahnhofstr. 87
90402 Nürnberg

Abstract

Die Single Subject Research ist ein pragmatisches empirisches Verfahren um die Wirkungen professionellen Handelns auf Einzelsysteme im Zeitverlauf zu analysieren. Sie hat eine bestechende Attraktivität, da sie relativ einfach und ohne größeren Zeitaufwand durchführbar ist. Sie bezieht sich unmittelbar auf die interessierenden Interventionen bei den einzelnen Klienten und versucht die Praxis-Wirksamkeit des professionellen Handelns zu bestimmen. Sie kann somit dazu beitragen, das Handeln der Akteure in der Sozialen Arbeit zu professionalisieren.

Ernstzunehmenden Kritikpunkte sind jedoch zu beachten: Wie bei allen quantitativ orientierten Verfahren ist zu fragen, ob die Operationalisierungen valide und reliabel sind, in welcher Art und Weise dadurch auf die zugrundeliegenden (komplexen) Zielvariablen geschlossen werden kann und ob und inwieweit die Ergebnisse verallgemeinerbar sind.

Insgesamt betrachtet erscheint die SSR als eine gute Möglichkeit, sich mit der Frage auseinanderzusetzen, ob die (pädagogischen) Interventionen bei Klienten etwas bewirken und zielt insbesondere auf den prozessualen Ablauf. Sie könnte dadurch eine gute Ergänzung zu anderen (Selbst-)Evaluierungen bilden, jedoch auch als eigenständiges Verfahren eingesetzt werden.

Single Subject Research – ein Evaluierungsverfahren auch für die Soziale Arbeit ?

In der amerikanischen Ausbildung der Sozialarbeiter wird seit über 20 Jahren die kontrollierte Einzelfallanalyse (Single Subject Research im Folgenden mit SSR abgekürzt) unterrichtet und in der sozialarbeiterischen Praxis angewandt. In Deutschland wurde das Verfahren bisher weder in der Ausbildung noch in der Praxis Sozialer Arbeit berücksichtigt¹.

Die quantitativ orientierte Analyse von Einzelfällen kann allerdings auch in Deutschland - in der experimentellen und klinischen Psychologie und den ihr nahe stehenden Disziplinen, z.B. Psychiatrie, auf eine lange Tradition zurückblicken (vgl. Flügel 1925; Huber 1977; Jacobs 1998; Hornung und Hinkel 1998, Petermann 1989; 1996; Bortz, Döring 2002, S. 579ff). In manchen Bereichen, wie z.B. innerhalb des operanten Ansatzes (Sidman 1960) und der Verhaltenstherapie (Lazarus & Davison, 1971; Yates 1970, 1975) nahm sie zeitweise sogar eine dominierende Stellung ein.

Zwar setzte in den 1970er Jahren auch in Deutschland eine verstärkte Diskussion um den Stellenwert der Einzelfallanalyse in den Sozialwissenschaften ein, sie dürfte jedoch gegenwärtig außerhalb von Psychologie, Psychiatrie und Neurologie wenig bekannt sein. Neuere Anwendungen finden sich in verhaltenstherapeutischen Ansätzen in der Heil- und Sonderpädagogik, in der Biermann (2004, S. 22-31) die Hoffnung ausdrückt, mit diesen Verfahren den „naiven Ansatz des Förderns und Hoffens“ zu überwinden und auf wissenschaftlicher Basis wirksame Förderansätze zu identifizieren und deren Effektivität überprüfen“ zu können (Vgl. auch Kern 1997; Julius, Schlosser, Goetze, 2000; Mühl 2002; Lauth & Freese, 2003; Biermann, 2004).

Im Rahmen der Evaluierung von Kompetenzagenturen (vgl. Braun & Schaub 2002; Braun 2003) wurde die SSR beispielhaft in einem Feld der Sozialen Arbeit eingesetzt und auf ihre Brauchbarkeit überprüft (vgl. Vestner, 2004; Wüstendörfer, 2005)

1. Was ist Single Subject Research?

Die Bezeichnung *Single Subject Research* bezieht sich auf eine Sammlung empirischer Verfahren, mit denen Veränderungen im Verhalten eines Klienten oder Klienten-Systems beobachtet und innerhalb eines bestimmten Zeitraums wiederholt gemessen werden.

Die SSR wird im deutschen Sprachraum u. a. auch als kontrollierte Einzelfallforschung, kontrollierte Einzelfallanalyse oder N=1 Forschung bezeichnet. In der SSR wird versucht, experimentelle Versuchsanordnungen (Designs, Versuchspläne) bei Einzelfällen nachzubilden, um dadurch die Wirkung von Interventionen zu erfassen. Dementsprechend können die SSR Designs als Experimentierpläne zur kontrollierten individuellen Interventionsplanung bezeichnet werden.

Yegidis und Weinbach (1996, S 233 – 234) beschreiben SSR als ein Forschungsverfahren, bei dem - wie bei anderen Forschungsverfahren - Daten gesammelt, aufgezeichnet, analysiert und dann für die praktische Entscheidungsfindung interpretiert werden. Wie bei der Evaluierung von Programmen geht es darum, die Praxis-Wirksamkeit zu beurteilen. Wie in der Längsschnittforschung wird eine wiederholte Messung derselben Variablen über die Zeit vorgenommen. Wie in experimentellen Designs wird eine unabhängige Variable als 'Kontrollgruppe' eingeführt. Anstelle des prinzipiellen Vergleichs zwischen verschiedenen Gruppen tritt der Vergleich zwischen verschiedenen Bedingungen bei einem Klienten oder Klienten-System über die Zeit.

2. Vorgehensweise in der Single Subject Research

Um die Verhaltens- bzw. Einstellungsunterschiede dokumentieren und nachweisen zu können, muss zunächst das erwünschte Verhalten, die abhängige Variable (AV), genau spezifiziert und gemessen werden. Anschließend erfolgt durch wiederholte Beobachtung (monitoring) eine fortlaufende Messung (repeated measurement) der AV zu verschiedenen Zeitpunkten und unter verschiedenen Bedingungen sowohl in der Nicht-Interventions- als auch während der Interventionsphase. Die Auswertung der für SSR typischen Graphen erfolgt vorwiegend anhand einer visuellen Analyse.

¹ Trotz umfangreicher Literaturrecherche konnte in den Datenbanken SOLIS , FORIS , BLISS, IHSLIT, DZI und WAO sowie in der Aufsatzdatenbank JADE - kein Hinweis auf die Single Subject Research bzw. die Durchführung von kontrollierten Einzelfallstudien im Bereich der Sozialen Arbeit in Deutschland bzw. im deutschsprachigen Raum gefunden werden (vgl. Vestner, 2004).

Von wenigen Ausnahmen abgesehen beginnen alle SSR Designs mit der Bestimmung einer Grundrate (engl.: Baseline), die auch als A-Phase bezeichnet wird: sie bildet das „übliche“ Verhalten des Klienten ohne die Einführung oder Präsenz der zuvor spezifizierten Intervention ab.

Während der A-Phase wird zunächst ein bestimmtes Verhalten, das beeinflusst werden soll, über einen festgelegten Zeitraum beobachtet, quantifiziert (mehrmals gemessen) und grafisch dargestellt (vgl. Abbildung 1). Während dieser Zeit erfolgt die zu evaluierende Intervention nicht. Andere Interventionen (the usual treatment) können jedoch initiiert oder fortgesetzt werden (vgl. Yegidis & Weinbach, 1996, S. 235).

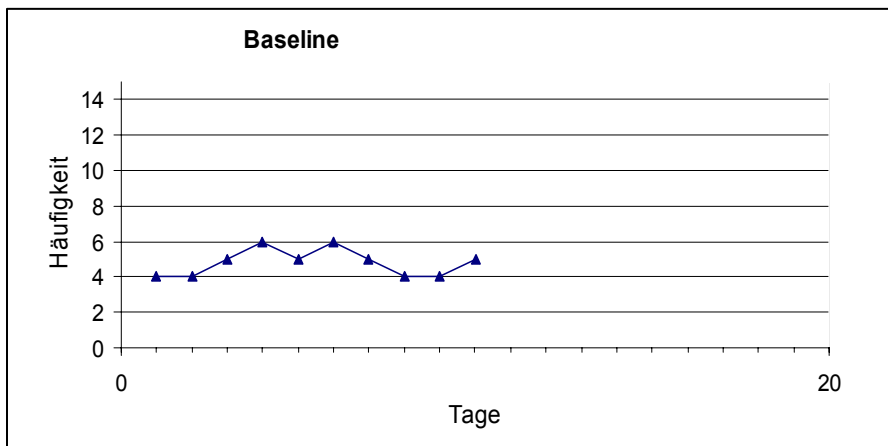


Abbildung 1: Beispiel einer hypothetischen Baseline mit 10 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten (zwischen 4 und 6).

Damit erfüllt die Baseline zentrale Aufgaben. In erster Linie verfolgt sie eine deskriptive Funktion, indem sie über das Ausmaß des erwünschten bzw. unerwünschten Verhaltens informiert. Sofern die Baseline eine gewisse Kontinuität aufzeigt, können Voraussagen über das zukünftige Verhalten – ohne intervenierenden Eingriff – gemacht werden (voraussagende Funktion). Sie gibt Auskunft darüber, ob mit Einführung der Intervention eine Verhaltensänderung eintritt oder nicht (feststellende Funktion) und anhand ihres Musters können Charakterisierungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Klienten vorgenommen werden (charakterisierende Funktion). Dies ist ein entscheidendes Kriterium für eine spätere Wiederholbarkeit (Replikation) der Untersuchung unter möglichst ähnlichen Ausgangsbedingungen (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 37 – 44).

A-Phasen erfüllen im SSR die Funktion von Kontrollgruppen in experimentellen Forschungsdesigns: sie bieten eine Vergleichsquelle indem sie anzeigen, ob und in welchem Ausmaß das angestrebte Verhalten auftritt, wenn die Intervention entweder nicht eingeführt - oder nach einer B-Phase zurückgezogen wurde (vgl. Yegidis & Weinbach, 1996, S. 239). Dem Mangel an einer realen Kontrollgruppe wird durch Designalternativen begegnet, um die Wirkungen von konkurrierenden Hypothesen und Designausrichtungen - in der Interpretation der Beziehung zwischen der Intervention und Veränderungen im angestrebten Verhalten - zu kontrollieren.

Eine an die A-Phase anschließende gleichlange Zeitspanne, in welcher die Intervention präsent ist, wird als Interventions- oder B-Phase bezeichnet. In den B-Phasen wird über eine festgelegte Zeit eine bestimmte Intervention als unabhängige Variable (UV) eingeführt und beobachtet, wie sich das Zielverhalten (engl.: target behavior) entwickelt. B-Phasen können deshalb mit Experimentiergruppen in experimentellen Forschungsverfahren verglichen werden.

2. 1 Spezifika der Messungen

Die mit SSR Designs erhobenen Messwerte werden in der Regel graphisch dargestellt, weil dadurch eine einfache, effektive und meist auch überzeugende Auswertung möglich ist. Im Prinzip ist die Aufzeichnung der Messungen unkompliziert: sie können entweder auf Standardmillimeterpapier oder mit Hilfe eines Kalkulationsprogramms, z.B. Excel erfasst werden. Darüber hinaus ist inzwischen auch spezielle Software (z.B. SingWin) zur Aufzeichnung und Auswertung verfügbar (vgl. Bloom, Fischer, Orme, 2002).

Die An- oder Abwesenheit von Interventionen bei der Messung wird auf dem Graphen deutlich gekennzeichnet: die Zeitabstände werden entweder als A- oder als B-Phase markiert. Das Zielverhalten (AV) wird entlang der vertikalen Achse (Y) und die Zeiteinheiten entlang der horizontalen Achse (X) angezeigt. Jeder Punkt auf dem Graphen spiegelt eine Messung des gezeigten Verhaltens und den Zeitpunkt der Messung wider. Die Punkte werden zu einem Liniendiagramm verbunden (vgl. Abb. 2).

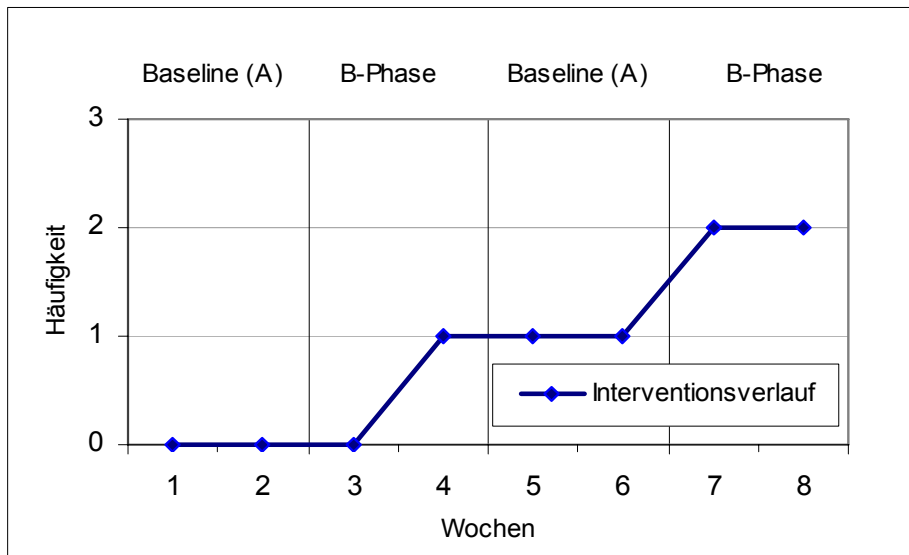


Abbildung 2: Beispiel eines hypothetischen Interventionsverlaufs mit 8 Messpunkten über einen Zeitraum von 8 Wochen mit einer Auftretenshäufigkeit des gezeigten Verhaltens von 0 – 2.

In der SSR werden die Messungen des Zielverhaltens normalerweise nach Häufigkeit, Dauer oder Zeitabstand variiert (vgl. Yegidis & Weinbach, 1996, S. 236). Die Interventionsabsicht erscheint dabei als wichtigstes Kriterium bei der Entscheidung, wie die AV zu messen ist.

Will man das Auftreten eines bestimmten Verhaltens erhöhen, wird man z.B. bei einem Schulschwänzer die Häufigkeit der Anwesenheit in der Schule messen. Soll dagegen die Zeitspanne, in der ein erwünschtes Verhalten gezeigt wird, erhöht werden, wird man gewöhnlich die Zeitdauer messen, die z.B. ein Auszubildender für die Vorbereitung auf eine Prüfung aufwendet. Soll eine gewisse Kontinuität im erwünschten Verhalten erreicht werden, wird man die Zeitabstände messen, in denen das angestrebte Verhalten nicht gezeigt wird, z.B. die Länge der Zeit zwischen einzelnen Bewerbungsaktivitäten.

2.2 Analyse der Aufzeichnungen

Die Analyse erfolgt anhand von sichtbaren Veränderungen im Niveau des Datenmusters. Besondere Aufmerksamkeit ist dem Übergang von einer Phase zur anderen zu widmen, vor allem in Bezug auf das Vorhandensein oder Fehlen eines Rückgangs oder Anstiegs innerhalb einer Baseline- oder Interventionsphase sowie von Änderungen in der Stabilität des Datenmusters beim Übergang von einer Phase zur nächsten.

Die visuelle Analyse der Graphen erfolgt im Wesentlichen nach den Kriterien Mittelwert, Level, Diskontinuität bzw. Stabilität sowie dem Trend. Der Mittelwert gibt Auskunft über Veränderungen der Durchschnittsrate eines Verhaltens. Der Unterschied im *Niveau (Level)* zwischen der Baseline- und der Interventions-Phase gibt Aufschluss über die Diskontinuität eines Verhaltens. Stabilität im Datenmuster einer vorausgehenden Phase bestimmt die Voraussagbarkeit eines Verhaltens zu einer nachfolgenden Phase. Bei Stabilität des Verhaltens zwischen Ende und Beginn einer Phase wird von einer *Latenz zum* Periodenwechsel gesprochen. Der Trend zeigt die Richtung der Daten, also die systematische Zu- oder Abnahme des Verhaltens über die Zeit. Von einem Slope spricht man, wenn sich innerhalb einer Phase Zu- oder Abnahme im Datenmuster zeigt. Um von einem Trend über zwei oder mehr Phasen - einem Drift (Antrieb) - sprechen zu können, muss der Slope jeder

einzelnen Phase allerdings in die gleiche Richtung, entweder auf- oder absteigend verlaufen (vgl. Bloom, Fischer, Orme, 2002, S. 555 ff.)

Zur Verdeutlichung zeigt der folgende Graph einen exemplarischen Interventionsverlauf über einen Zeitraum von 8 Wochen, mit jeweils einer Messung pro Woche. In allen vier Phasen zeichnet sich ein Slope ab, der jeweils in die gleiche Richtung (Aufwärtstrend) zeigt und somit einen *Drift* darstellt. Dabei spielt es keine Rolle, dass an den Übergängen von der ersten A- zur B-Phase und von der B- zur zweiten A-Phase nur eine latente Veränderung im Verhalten zu beobachten ist. Der Unterschied im Niveau von der zweiten A-Phase zur zweiten B-Phase basiert hier auf dem Vergleich der Mittelwerte, könnte aber genauso auf dem Vergleich einzelner Datenpunkte verschiedener Phasen bestehen.

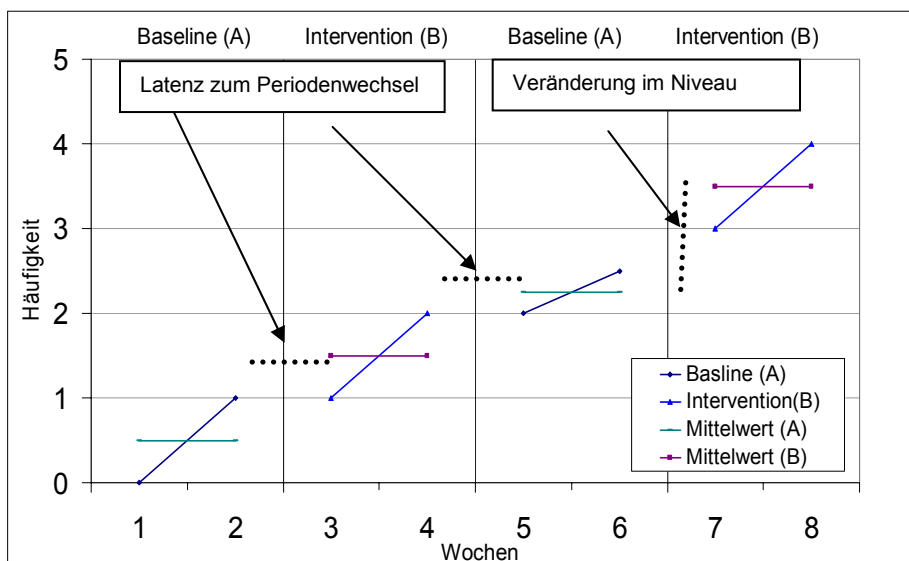


Abbildung 3: Beispiel eines hypothetischen Interventionsverlaufs, der die Veränderungen im Niveau und Trend des Zielverhaltens visualisiert

Darüber hinaus kann der Unterschied zwischen Nicht-Interventions-Phasen und Interventionsphasen, der für den Nachweis der Praxis-Wirksamkeit von Interventionen entscheidend ist, auf einfache Weise auch rechnerisch ausgedrückt werden. Der Prozentsatz sich nicht überlappender Daten (PND) liegt im Idealfall bei 100, wenn sich *alle* Messpunkte der Interventionsphase – je nach angestrebter Richtung der Verhaltensänderung – ober- oder unterhalb der Messpunkte der vorausgehenden Baseline-Phase befinden. Je nach der Problemlage des Einzelfalles können auch niedrigere PND-Werte bedeutende Fortschritte bedeuten. In dem in Abbildung 3 dargestellten hypothetischen Interventionsverlauf liegen die zwei Werte der ersten Baseline bei „0“ und „1“, die zwei Werte der ersten Interventionsphase bei „1“ und „2“. Dies ergibt einen Prozentsatz nicht überlappender Daten (PND) von 50 (1 von 2 Datenpunkten). Die zweite Baseline-Phase hat die Werte „2“ und „2,5“, die zweite Interventions-Phase die Werte „3“ und „4“. Der PND liegt bei 100 (2 von 2 Datenpunkten) (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 137 ff).

Darüber hinaus können auch deskriptive Statistiken und Signifikanztests, z.B. t-Tests und Varianzanalysen gerechnet werden.

2. 3 Design-Varianten von Single Subject Research

Ein SSR-Design besteht aus einer oder mehreren - zeitlich vorbestimmten - Baselines (A-Phasen), die mit einer oder mehreren Interventionsphasen (B-Phasen) systematisch variieren. Unterschiedliche Zusammenstellungen und Abfolgen von A- und B-Phasen (unterschiedliche SSR-Designs) haben verschiedene Merkmale und Verwendungsmöglichkeiten.

2.3.1 Basale Single Subject Research Designs

B-Design

Die grundlegendste und meist angewandte Methode der Evaluation Sozialer Arbeit könnte als B-Design bezeichnet werden. Es besteht aus der Einführung der Intervention mit anschließender Beobachtung des Verhaltens. Wird die Beobachtung jedoch als ein Teil von SSR durchgeführt, finden – im Gegensatz zur üblichen Praxis - kontrollierte Messungen im Sinne einer Quantifizierung des Zielverhaltens statt, die aufgezeichnet werden und die das Verhalten des Klienten während der Intervention widerspiegeln.

Der Graph in Abb. 4 demonstriert die Grundzüge einer B-Phase und zeigt, dass das gemessene Verhalten systematisch über die erhobenen 20 Messpunkte in der gewünschten Richtung zunimmt. Dennoch lässt sich nicht sagen, dass die *Intervention* zu der gewünschten Verhaltensänderung geführt hat, denn es fehlt die Erhebung der Baseline und damit das für SSR zentrale Kriterium der experimentellen Kontrolle, mit dem ein Kausalzusammenhang zwischen Intervention und Verhaltensänderung hergestellt werden kann.

Die Durchführung einer isolierten B-Phase macht allerdings dann Sinn, wenn – wie in der Prozessforschung - die Veränderungsprozesse im Interventionsverlauf untersucht und dokumentiert werden sollen. Mit einem B-Design kann z.B. untersucht werden, ob spezifische Interventionen in Zusammenhang mit systematischen Änderungstrends stehen (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 46, 47).

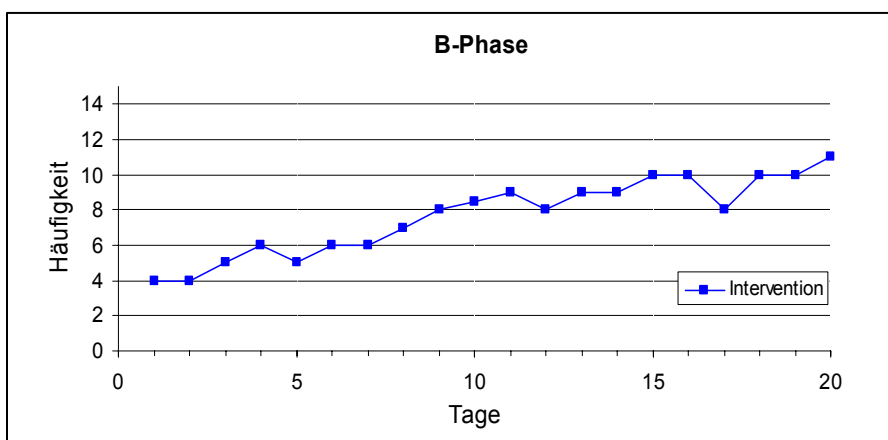


Abbildung 4: Hypothetisches Beispiel für einen B-Design mit 20 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten zwischen 4 und 11.

AB-Design

Ein AB-Design besteht aus zwei Phasen, einer Nicht-Interventions-Phase (A-Phase) in der die Baseline bestimmt wird, gefolgt von einer Interventionsphase (B-Phase).

Obwohl es sich auch beim AB-Design nicht um einen sog. experimentellen Design handelt, erlaubt er doch – wie der Graph in Abb. 5 verdeutlicht - den logischen Vergleich einer Interventions- mit einer Nicht-Interventionsphase, als minimales Arrangement von Bedingungen, für eine mehr oder weniger objektive Beurteilung der Situation des Klienten vor, während oder nach einer Intervention (vgl. Bloom, Fischer, Orme, 2002, S. 381).

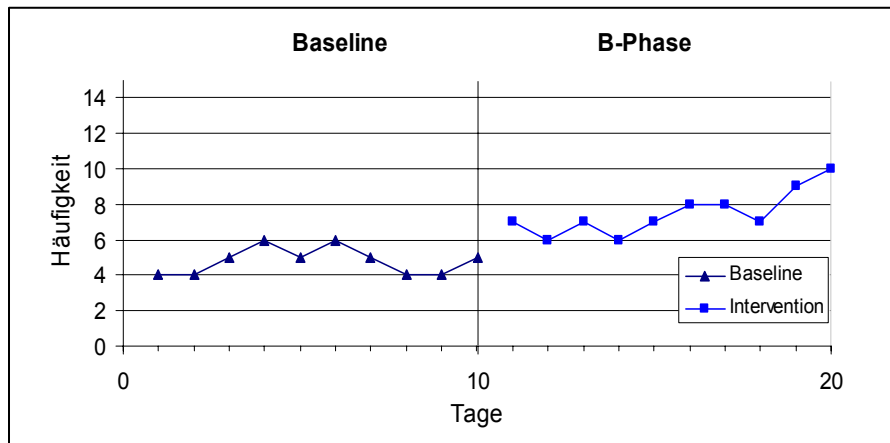


Abbildung 5: Beispiel für einen hypothetischen Interventionsverlauf an einem A-B Design mit 20 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten während der Baseline zwischen 4 und 6 und während der Interventionsphase zwischen 6 und 10.

Mit AB-Designs können nur vorläufige Schlussfolgerungen hinsichtlich des Ursache-Wirkungszusammenhangs von Interventionen getroffen werden.

Obwohl die interne Validität eines AB-Designs als sehr gering einzuschätzen ist, könnte es als „hypothesengenerierendes“ Verfahren eingesetzt werden, das in praktischen Kontexten Sozialer Arbeit immer dann angezeigt wäre, wenn zusätzliche Kontrollbedingungen aufgrund mangelnder Praktikabilität bzw. ethischer Bedenken nicht eingeführt werden können (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 51).

2.3.2 Experimentelle Single Subject Research Designs

Will man tatsächlich die Wirkung von Interventionen demonstrieren, muss der AB-Design mindestens um eine weitere experimentelle Phase erweitert werden, wobei zu den Bedingungen bei der Bestimmung der Baseline zurückgekehrt werden muss.

Den experimentellen SSR Designs liegen im Wesentlichen zwei grundlegende Schemata zugrunde (vgl. Horning & Hinkel, 1998): das sind zum einen der Rücknahme-Design (withdrawal), zu dem auch der Umkehrungs-Design (reversal) gerechnet wird und zum anderen Designs mit mehreren Baselines (multiple baseline).

Die Rücknahme- und Umkehr-Designs

Bei den Rücknahme- bzw. Umkehr-Designs wechseln sich Nicht-Interventionsphasen (A-Phasen) mit Interventionsphasen (B-Phasen) in unterschiedlichen systematischen Anordnungen ab. Dabei wird beim Übergang von einer Phase zur nächsten immer nur eine Variable verändert (changing *one* variable at a time).

Rücknahme oder Abzug (withdrawal) bedeutet das Stoppen der Intervention, während weiterhin gemessen wird und die Messungen des Zielverhaltens aufgezeichnet werden. Diese Methode wird üblicherweise in zweiten und nachfolgenden A-Phasen im SSR verwendet.

Umkehrung (reversal) dagegen ist der bewusste Versuch, mit einer anderen Intervention, die Richtung der Veränderung ins Gegenteil umzukehren, die während der B-Phase durch die vorherige Intervention auftrat.

ABA-Design

Der ABA-Design besteht aus drei Phasen. Einer Baseline-Phase folgt eine Interventionsphase mit einer anschließenden zweiten Baseline-Phase. Die zweite A-Phase des ABA-Designs sowie anderer Designs, die mehr als „eine“ A-Phase anwenden, kann entweder durch die Rücknahme (withdrawal) oder durch Umkehrung (reversal) der Intervention charakterisiert werden. Damit erfüllt ein ABA-Design die Mindestanforderungen eines experimentellen Designs.

Wenn sich nach Rücknahme der Intervention das Zielverhalten wieder der Ausgangssituation der Baseline nähert, lässt sich relativ sicher sagen, dass die Intervention für die Veränderung im Zielverhalten verantwortlich zeichnet. Im Umkehrschluss bedeutet dies: wenn sich vorhergesagte Veränderungen in der B- und zweiten A-Phase zeigen, ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich diese Änderungen auch ohne die eingeführte Intervention ergeben hätten (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 57). Der Graph in Abbildung 6 zeigt eine deutliche Zunahme des beobachteten Verhaltens während der B-Phase, während sich das gezeigte Verhalten nach Abzug der Intervention in der zweiten A-Phase wieder der Ausgangssituation annähert. Entsprechend obiger Ausführungen kann man bei einem derartigen Kurvenverlauf annehmen, dass die Intervention wirksam war.

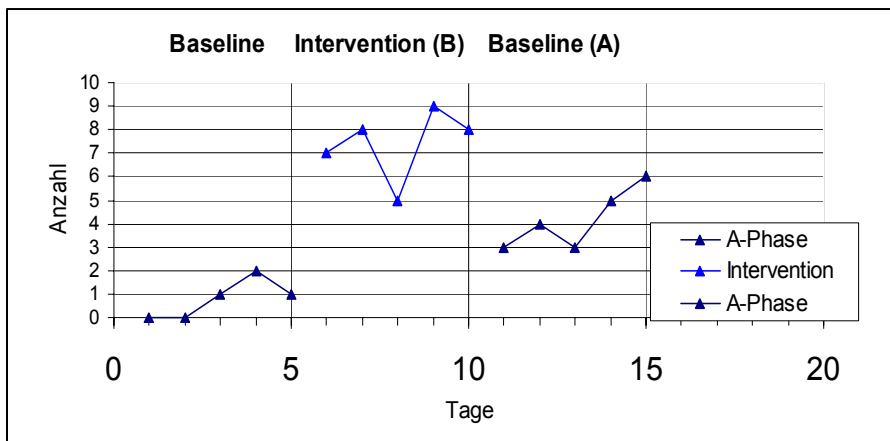


Abbildung 6: Beispiel eines hypothetischen Interventionsverlaufs an einem A-B-A Design mit 15 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten während der Baseline zwischen 0 und 6 und während der Interventionsphase zwischen 5 und 9.

BAB-Design

Ein BAB-Design eignet sich dazu, die Wirkung einer bereits laufenden Intervention zu evaluieren. Wie ein ABA-Design besteht er aus drei aufeinander folgenden Phasen – nur in umgekehrter Abfolge.

Als nachteilig wird bei dieser Versuchsanordnung der Umstand betrachtet, dass der Sachverhalt, der zur Intervention geführt hat, in die Untersuchung nicht einbezogen ist. Will man allerdings wissen, inwieweit eine bereits etablierte Intervention wirkt, ist ein BAB-Design nach Julius, Schlosser & Goetze (2000, S. 65) durchaus sinnvoll. Der Graph in Abbildung 7 zeigt ein BAB-Design mit einem hypothetischen Kurvenverlauf, aufgrund dessen eindeutiger Ausprägung davon auszugehen wäre, dass die Intervention „gewirkt“ hat.

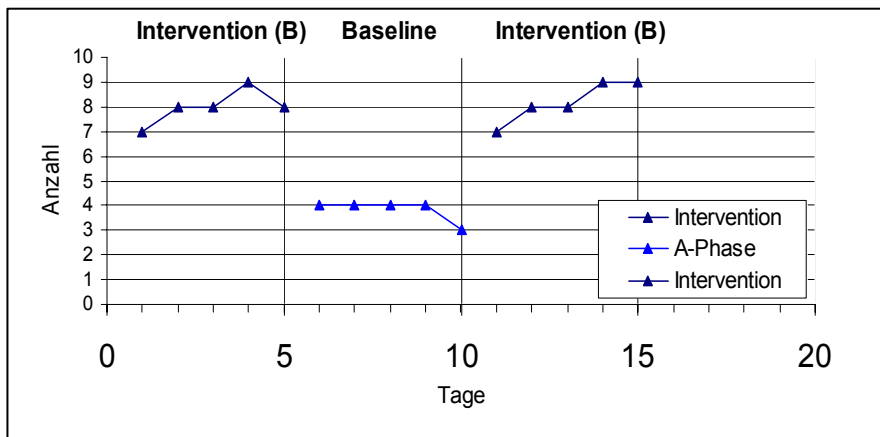


Abbildung 7: Beispiel für ein hypothetisches B-A-B-Design mit 15 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten zwischen 7 und 9 in der Interventions-Phase und zwischen 3 und 4 in der dazwischen liegenden A-Phase.

ABAB-Design

Ein ABAB-Design beginnt mit einer Baseline-Phase (A), wechselt in regelmäßigen Zeitabständen mit einer Interventionsphase (B), einer zweiten A-Phase und endet schließlich mit einer Interventionsphase. Im Gegensatz zu Julius, Schlosser & Goetze (a.a.O) stellt nach Yegidis & Weinbach (1996) erst diese Versuchsanordnung die grundlegendste Art der Durchführung eines Umkehrungs- oder Rücknahme-Designs dar.

Mit der ersten B-Phase wird das Ziel verfolgt, das Verhalten unter der Intervention genau zu beschreiben und eine Vorhersage über die weitere Entwicklung des Verhaltens zu treffen. Die zweite A-Phase hat die Funktion, eine Prognose über den künftigen Verlauf des Verhaltens ohne weitere Intervention zu treffen. Außerdem wird überprüft, ob sich der tatsächliche Verlauf von dem in der vorhergehenden B-Phase prognostizierten Verlauf deutlich unterscheidet und ob Unterschiede im Vergleich zur ersten A-Phase aufgetreten sind.

Erst durch die zweifache Wiederholung jeder Bedingung (ABAB) können erste kausale Aussagen über die Wirksamkeit der Intervention getroffen werden. Der Graph in Abbildung 8 zeigt den hypothetischen Interventionsverlauf bei einem ABAB-Design.

Falls die Intervention wirksam ist, wird angenommen, dass sich der Kurvenverlauf relativ schnell dem der ersten Grundlinie annähert. In der zweiten Interventionsphase müsste sich der Kurvenverlauf – bei einer entsprechend wirksamen Intervention - dann wiederum der Richtung des Kurvenverlaufs der ersten B-Phase annähern. Ist dies der Fall, handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um eine kausale Beziehung.

Damit werden aus experimenteller Sicht die Schwächen der vorher besprochenen Designs überwunden und eine interne Validität hergestellt – was allerdings in der Praxis mit einem relativ hohen Aufwand verbunden ist (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 66 - 72).

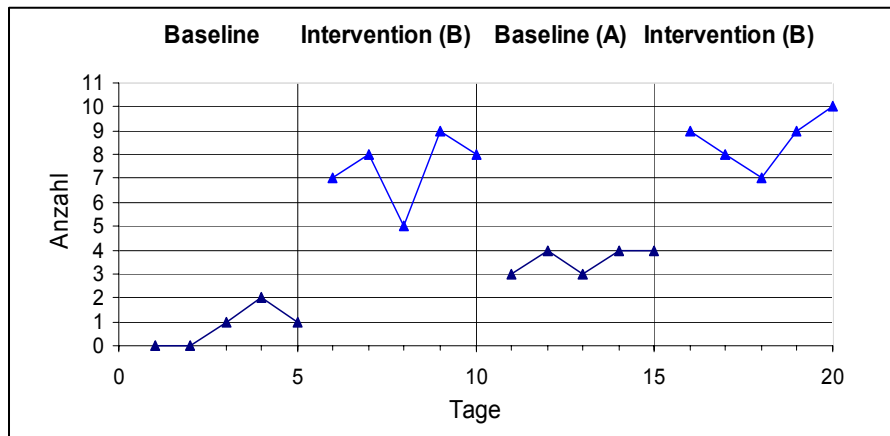


Abbildung 8: Beispiel für einen hypothetischen A-B-A-B-Design mit 20 Messpunkten und den Auftretenshäufigkeiten im beobachteten Verhalten zwischen 0 und 10.

Multiple-Treatment-Design (MTD)

Ein Multiple-Treatment-Design (MTD) stellt eine Erweiterung des ABAB-Designs dar.

Anstelle von nur einer Intervention werden zwei oder mehrere Interventionen oder auch Kombinationen mehrerer Interventionen eingeführt. Mögliche Designabfolgen wären z.B. A-B-A-B-C-B-C, A-B-A-B-BC-B-BC. Dadurch kann die Effektivität mehrerer Interventionen miteinander verglichen werden. Zu bedenken ist hier nach Julius, Schlosser & Goetze (2000, S. 74), dass durch die längere Versuchsdauer Reifungsvorgänge, Carry-over- oder Sequenzeffekte eintreten können.

Multiple Baseline Design (MBD)

Ein multipler Baseline-Design (MBD) ist eine Kombination einzelner AB-Designs, die zeitlich zueinander versetzt werden. Dadurch unterscheiden sich die einzelnen AB-Designs jeweils in der Länge der A- und B-Phase. Ein MB-Design kann sich dabei über unterschiedliche Settings, Personen, Verhaltensweisen etc. erstrecken. Es gibt eine UV (die Interventionsmethode) und mehr als eine AV (z.B. Setting, Person, Verhaltensweisen). Die Intervention wird zuerst auf das Verhalten (bzw. Setting, Person) angewandt, welches die größte Stabilität während der anfänglichen Messung der Baseline widerspiegelt.

Für ein erstes Verhalten (erstes Setting bzw. erste Person) wird eine Baseline bestimmt, auf die anschließend eine Intervention erfolgt. Zeitgleich wird bei einer zweiten AV ebenfalls eine Baseline bestimmt, die jedoch länger andauert, als bei der ersten AV. Die gleiche UV wie im ersten Fall wird anschließend zeitversetzt auf die zweite AV angewandt usw. (vgl. Abb. 9). Je mehr AVs in die Untersuchung einbezogen werden, desto länger dauern die A-Phasen, d.h., desto länger muss abgewartet werden, bis für die weiteren Verhalten, Settings oder Personen die Intervention eingeführt werden kann.

Kausale Wirkungszusammenhänge können nur dann angenommen werden, wenn sich in allen B-Phasen Veränderungen zeigen.

Im Unterschied zum ABAB-Design können mit Hilfe eines MBD-Designs Ursache-Wirkungszusammenhänge wiederholt über *mehrere* Verhalten, Settings, Personen etc. erfolgen. Trotzdem eignet sich der ABAB-Design – wegen der wiederholten AB-Phasen an nur einem Verhalten zum Nachweis kausaler Wirkungszusammenhänge besser. Sofern allerdings eine Umkehr oder Ausblendung des einmal gelernten Verhaltens nicht möglich oder nicht gewünscht ist, bietet ein MBD-Design eine gute Alternative.

Abbildung 9 zeigt den hypothetischen Ablauf eines MBD-Designs über drei verschiedene Beobachtungssituationen, jeweils mit der gleichen Intervention (vgl. Julius, Schlosser & Goetze (2000, S. 77 – 87).

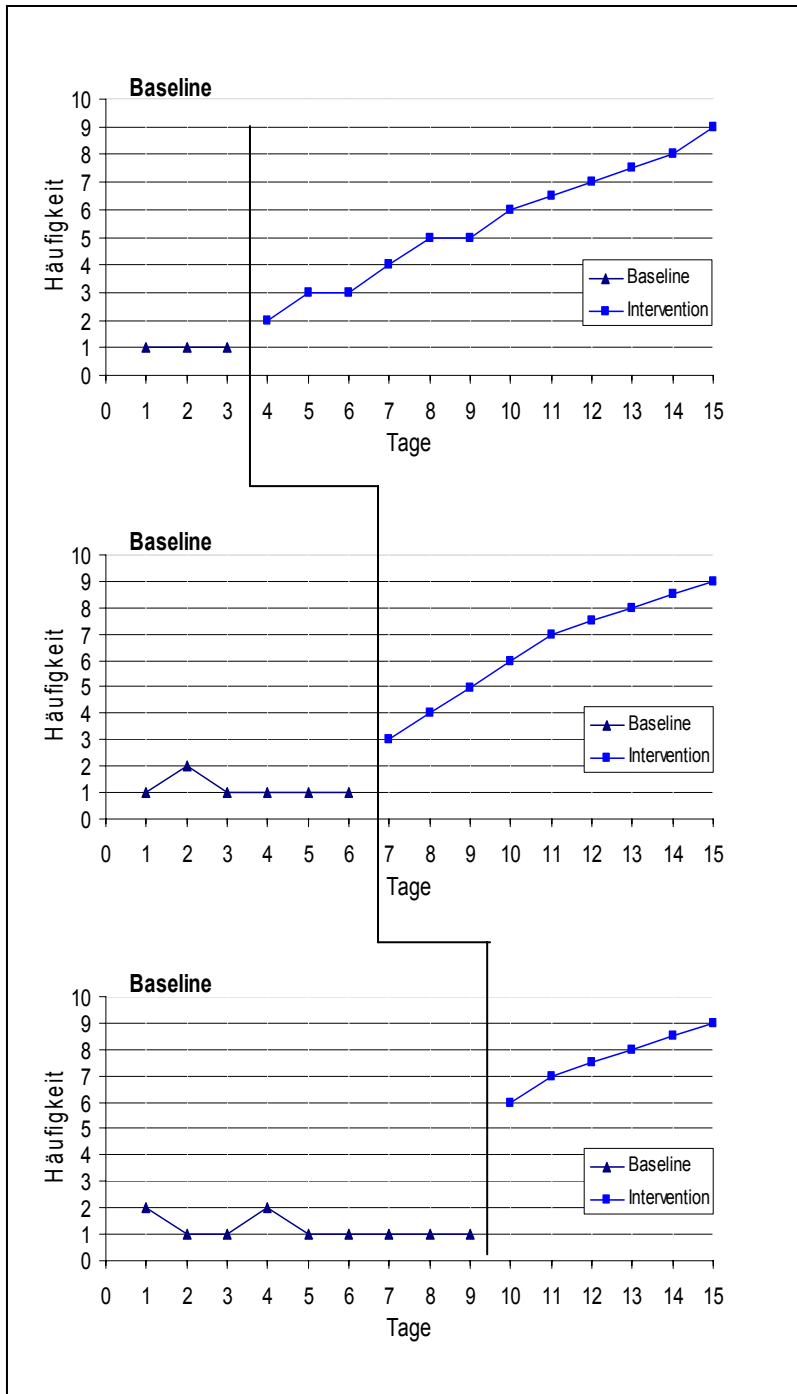


Abbildung 9: Geringfügig veränderter beispielhafter Aufbau eines MBD-Versuchsplans; Quelle: Julius, Schlosser & Goetze (2000, S. 78)

Changing Criterion Design (CCD)

Nach der Logik des Changing Criterion Designs (CCD) sind Rückschlüsse auf kausale Wirkungszusammenhänge zwischen Intervention und Verhalten dann möglich, wenn sich das Zielverhalten sukzessive an die - zuvor mit dem Klienten – vereinbarten Lernziele annähert. Es trägt damit dem Umstand Rechnung, dass viele erwünschte Verhaltensziele nur schrittweise zu erreichen sind. Bei dem CCD steht die graduelle Veränderung von Verhaltensweisen und deren Auf- oder Abbau in eine erwünschte Richtung im Mittelpunkt.

Bei diesem Design handelt es sich im Prinzip um einen AB-Design mit dem Unterschied, dass die B-Phase eine längere Dauer aufweist und in mehrere Teilphasen gegliedert ist (B1, B2, B3 ...). Jede Teilphase stellt ein bestimmtes Niveau eines vereinbarten Lernzieles dar, das jeweils erreicht sein muss, bevor das nächste Niveau erklommen werden kann (vgl. Abb. 10). Ausschlaggebend für die Bestimmung des ersten zu erreichenden Kriteriums ist das gezeigte Verhalten in der A-Phase. Sofern die erste Teilphase (B1) mit einem über dem Mittelwert der Baseline liegenden Kriterium erfolgreich bewältigt wird, dient dieser Datenverlauf als neuer Standard für das nächste Kriterium, wobei ein Ausblenden der Intervention nicht zwingend erforderlich ist. (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 89 – 96).

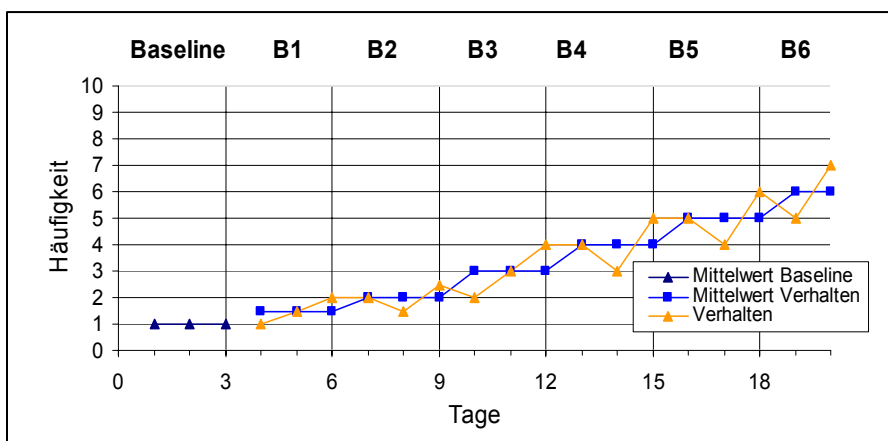


Abbildung 10: Beispiel für einen CCD-Design mit einem hypothetischen Interventionsverlauf

Alternating Treatment Design (ATD)

Beim ATD-Design geht es – nach vorheriger Bestimmung einer Baseline – darum, alternierende Interventionen im schnellen systematischen Wechsel durchzuführen, um die Überprüfung der relativen Wirksamkeit von gleichzeitig oder kurz nacheinander eingeführten Interventionen herauszufinden und zu überprüfen, welche Intervention effektiver war. Der ATD-Design ist gegen Störfaktoren relativ unempfindlich: für alle möglichen Eventualitäten wurden Designvarianten entwickelt, um diese auszuschließen. Um beispielsweise die Sequenzefekte zu neutralisieren wird die Reihenfolge der Interventionen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt (randomisiert) oder ausbalanciert. Mit der ausbalancierten Versuchsanordnung wird versucht, den möglichen Einfluss von Störfaktoren *gleichmäßig* auf die verschiedenen Interventionen zu verteilen.

Zur Verdeutlichung zeigt die nachfolgende Tabelle eine ausbalancierte Interventionsanordnung (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 97 – 114).

Tag Zeit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1	C	B	B	C	B	B	C	B	B	C	B	B	C	B	B	C	B	B	C	B
T2	B	C	C	B	C	C	B	C	C	B	C	C	B	C	C	B	C	C	B	C

Tabelle 1: Beispiel einer ausbalancierten Interventionsanordnung eines ATD mit 20 Messzeitpunkten

Eine Sonderform des ATD stellt der Adapted Alternating Treatments Design (AATD) dar. Im Unterschied zu einem Standard-ATD wird jeder Intervention ein spezifischer Aufgabensatz zugeordnet. Dabei wird die Strategie als überlegen angesehen, mit der das Lernkriterium als erstes erreicht wird (vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, 114). Der Graph in Abbildung 11 zeigt einen beispielhaften Interventionsverlauf an einem ATD-Design.

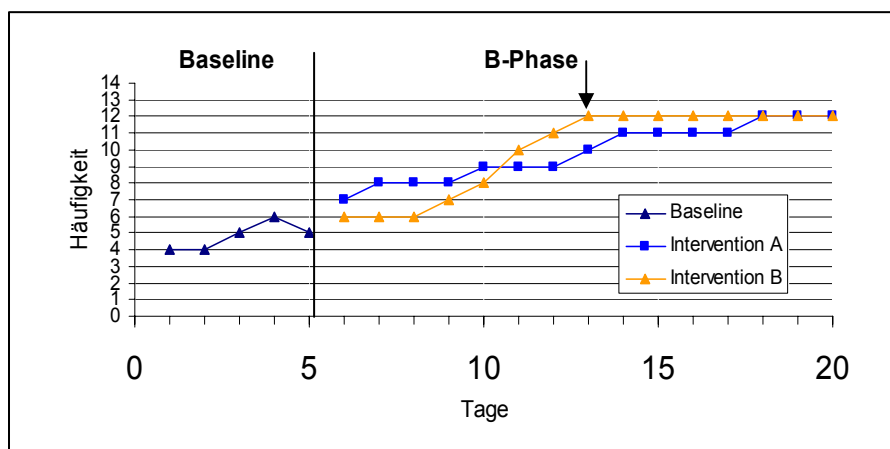


Abbildung 11: Beispiel eines hypothetischen Interventionsverlaufs an einem ATD-Design mit zwei zeitgleich einsetzenden Interventionen. Der Pfeil markiert das festgelegte Zielkriterium, das durch die Intervention B schneller erreicht wurde.

2.4 Replikation und Generalisierung

Ein besonderes Thema in der Single Subject Research ist die Frage nach der Generalisierung von Untersuchungsergebnissen, die nur bei einem einzelnen Klienten erhoben wurden (vgl. Hornung & Hinkel, 1998).

Durch Replikation lässt sich zwar aufzeigen, dass SSR dazu geeignet sein könnte, allgemein gültiges Wissen oder Ergebnisse mit externer Validität zu schaffen. Das gelingt allerdings nur, wenn eine Reihe von Studien dieselben abhängigen und unabhängigen Variablen und dieselben Designs - auf Teilnehmer mit demselben Verhalten oder Problemen - anwenden, um über den Einzelfall hinausgehende Erkenntnisse zu erhalten.

Der Mangel an externer Gültigkeit der meisten Ergebnisse ist die größte Beschränkung der Single Subject Forschung. Ohne sorgfältige Replikation kann SSR keinerlei Hinweise darauf liefern, mit welchen Personengruppen oder -kategorien eine Intervention wirksam sein kann oder nicht (Yegidis & Weinbach, 1996, S. 253).

Hingegen kann ein Kausalzusammenhang auf der Datenbasis eines Falles - und damit interne Validität - bereits mit einem A-B-A-B-Design hergestellt werden. In dem Maße, in dem der Interventionsprozess durch die Anordnung spezifischer Designs oder Anzahl von Studienphasen zunehmend strukturiert wird, erhöht sich die interne Validität.

3. Zur Beurteilung der Single Subject Research

Die SSR bietet wie jedes andere Verfahren der (Selbst)Evaluierung eine Reihe von positiven Effekten, die v. Spiegel (1993,1998) mit Kontrolle, Aufklärung, Qualifizierung und Innovation beschrieben hat. Diese Auswirkungen werden im Folgenden im Hinblick auf die SSR zusammen mit deren spezifischen Stärken diskutiert. Kritikpunkte werden anschließend thematisiert. Eine Gesamteinschätzung schließt diesen Artikel ab.

3.1 Möglichkeiten und Stärken

Zielsetzung, Mittelauswahl und Klärungsprozesse

Fachkräfte in der Sozialen Arbeit werden häufig mit dem Vorwurf mangelnder Klarheit in der Zielformulierung konfrontiert. Übersehen wird hierbei, dass neben der Komplexität des Gegenstandsbereichs Sozialer Arbeit immer auch die Besonderheiten des Einzelfalles beachtet werden müssen, wobei vor allem auch der Prozesscharakter des Interventionsverlaufs eine wichtige Rolle spielt (vgl. Heiner, 1988, S. 13).

In der SSR konzentrieren sich die Fachkräfte besonders auf den Prozessverlauf mit Fokus auf Intervention und Zielvereinbarung.

Zwar löst die Methodik von SSR die Komplexität des Gegenstandsbereichs Sozialer Arbeit nicht auf, aber es macht den Prozesscharakter des Interventionsverlaufs deutlich sichtbar. Als Teil des Interventionsprozesses unterstützt SSR die schrittweise Problemlösung. Es begleitet den Problemlöser durch Versuch und Irrtum – nur systematischer als in der „üblichen“ Praxis.

Wie alle Evaluationsverfahren, fördert die SSR grundsätzlich das methodisch-systematische Vorgehen. Sie kann den Klärungsprozess in der Auswahl der Interventionen und Festlegung von Zielvereinbarungen auf Seiten der Fachkräfte und der Klientel unterstützen – und beschleunigen. Ihre Methodik – die Bestimmung der Designs – zwingt zu methodischer Vorgehensweise unter der zentralen Fragestellung, was mit einer bestimmten Intervention wie erreicht werden soll. Die Fachkraft und der Klient müssen sich festlegen, woran sie erkennen werden, ob eine Intervention wirkt oder nicht.

Dies lässt sich bereits mit einem einfachen B-Design darstellen, weil sich mit diesem zumindest der Prozesscharakter des Interventionsverlaufs klar abbilden lässt.

Jede, beispielsweise durch einen im Team erarbeiteten Beobachtungsbogen erfasste Verhaltensänderung – ob erwünscht oder unerwünscht – lässt sich damit ohne viele Worte veranschaulichen und aufgrund der systematisch-methodischen Messung des Verhaltens auch empirisch belegen.

SSR erhebt nicht den Anspruch, die Komplexität des Gegenstandsbereichs Sozialer Arbeit als Ganzes abbilden zu wollen. Ihre Qualität liegt vielmehr in der vertieften Betrachtung von fest umrissenen, klar begrenzten Einzelthemen, die einer genaueren methodisch-systematischen Beobachtung unterzogen werden.

Durch die klaren Vorgaben der SSR birgt das Verfahren die Chance, die Handlungsketten durch das Zerlegen in kleinste Einzelschritte beobachtbar und messbar zu machen. So werden nach und nach auch komplexe Strukturen überschaubar und damit steuerbarer.

SSR erhebt auch nicht den Anspruch, die Komplexität schlecht strukturierter Probleme mit denen sich die Akteure Sozialer Arbeit konfrontiert sehen, abbilden zu wollen – oder zu können.

In der Praxis Sozialer Arbeit steht hinter der Einführung einer Intervention immer die Annahme (Hoffnung), dass sich das Verhalten des Klienten in die beabsichtigte Richtung entwickelt und das Interventionsziel erreicht wird.

In der SSR ist das ebenso. Im Unterschied zur „üblichen“ Praxis wird das beobachtete Verhalten genau aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen haben nichts mit Aktenführung zu tun, sondern versetzen den Beobachter in die Lage, empirisch nachweisen zu können, welche Wirkung eine Intervention auf das beobachtete Verhalten hat.

Fachlichkeit, Qualifizierung und Motivation

Das forschungsorientierte Evaluationsverfahren macht nicht nur die Auseinandersetzung mit aktueller Fachliteratur notwendig, es fördert darüber hinaus die fachliche Diskussion mit Kollegen im Team von der Entwicklung der spezifischen Designs über den Interventionsprozess bis zu dessen Auswertung. Die Auswahl bestimmter Methoden sollte dabei durch die Fachkräfte gegenüber Klienten und Kollegen offengelegt sowie im Hinblick auf die Zielsetzung begründet und diskutiert werden.

Die visuelle Analyse der Einzelergebnisse ermöglicht auch Teammitgliedern, die nicht in einen bestimmten Prozessverlauf involviert waren - einen relativ schnellen Überblick – nicht nur über einen einzigen Einzelfall. Unter bestimmten Fragestellungen lassen sich in einem Arbeitsfeld Auffälligkeiten, Abweichungen oder Ähnlichkeiten über mehrere Interventionsverläufe diskutieren und neue Perspektiven in der konkreten Fallarbeit entwickeln (vgl. Vestner, 2004, S. 95).

Bei der Auswertung der Einzelfälle anhand der visuellen Analyse sollte jeder Einzelfall durch die Fachkräfte – trotz Operationalisierung des Zielverhaltens – ganzheitlich betrachtet werden. Die visuelle Analyse schärft dabei den Blick für das Wesentliche, weil Schwankungen im Interventionsverlauf sofort „mit einem Blick“ deutlich und damit einer kritischen Reflexion eher zugänglich werden.

Während der Anwendung von SSR wird die „Kontrolle“, d.h. die Rückbesinnung auf die in der Konzeption formulierten Ziele bzw. anderen externen Erfolgskriterien notwendig. Die SSR fördert dabei besonders die Reflexion auf die Beziehung zwischen Interventionen und dadurch erreichten Veränderungen. Insofern werden Hilfesettings und Interventionsverläufe („Aufklärung“) besonders fokussiert.

Einen hohen Stellenwert dürfte die Anwendung von SSR für die „Qualifizierung“ haben, da besonders fachliche Diskussionen über angemessenere und damit zielgerichtete methodische Vorgehensweisen angeregt werden (kollegiale Beratung). Damit einhergehend werden neue Interventionen diskutiert und evtl. eingeführt.

Durch die SSR können - und das ist ein wesentlicher Unterschied zur *normalen* Praxis - selbst kleine Veränderungen, die im Alltagsgeschehen untergehen, mit einem Blick wahrgenommen werden. Möglicherweise sind diese ersten Hinweise Grund dafür, sich noch kleinere Teilbereiche genauer anzusehen, um sie entweder zum Gegenstand einer Intervention zu machen, oder diesen Aspekt aus dem Problemlösungsprozess ausklammern zu können.

Gerade in schwierigen Fällen können diese – erst durch die visuelle Analyse sichtbar gewordenen, graduellen - Veränderungen einen Motivationsschub leisten und Fachkräfte motivieren, „an dem Fall dranzubleiben“. SSR stärkt damit die Eigenmotivation und beugt der Einkehr von unangemessener Routine in der täglichen Fallarbeit vor.

3.2 Grenzen und Schwächen

Kausalität und Übertragbarkeit

Wie bei allen Evaluierungen ist der Nachweis kausaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nicht ohne weiteres zu führen. Selbst ein differenzierter SSR-Versuchsplan ist nur eine grobe Annäherung an die Erfordernisse eines Experiments, das letztlich über kausale Einflussfaktoren informieren könnte.

Voraussetzung für die Vermutung eines kausalen Zusammenhang ist bei der SSR, dass ein Verhalten im Lauf der Zeit als dauerhaft auftretend beobachtet worden ist (stabil, zunehmend, abnehmend, verschwindend, in wiederholter Weise). Dies hat zur Folge, dass u.U. eine relativ hohe Anzahl von Messpunkten erhoben werden muss. Die angestrebte Veränderung ist dabei genauso zu spezifizieren, wie die Intervention, mit der diese Veränderung erzielt werden soll. Je nach Problemsituation und Zieldefinition – kann dies einen relativ langen Erhebungszeitraum über Monate oder sogar Jahre erforderlich machen. Denn komplexe Verhaltens- oder Einstellungsänderungen passieren nicht einfach über Nacht, sondern werden oft erst im Zeitverlauf und möglicherweise erst lange Zeit nach einer erfolgten Intervention beobachtbar und damit messbar. Dies erfordert den Einsatz komplizierter Designs, um relevante Störvariablen oder Reifungsprozesse als Ursache der Verhaltens- bzw. Einstellungsänderung weitgehendst ausschließen zu können. Dies ist in der Praxis Sozialer Arbeit kaum realisierbar. Hinzu kommen die manchmal überaus schwierig zu interpretierenden Verläufe der beobachteten Variablen.

Die Kritik ist berechtigt. Dennoch könnte von der Vermutung ausgegangen werden, dass je schneller sich das Verhalten eines Klienten nach Einführung einer Intervention in die angestrebte Richtung entwickelt, desto mehr ist dies auf die Intervention zurückzuführen. Dies gilt bereits bei einem basalen B-Design. Letztlich kann jedoch einer möglicherweise verzerrenden Interpretation aufgrund subjektiver und/oder sozialer Erwünschtheit durch die Diskussion der Ergebnisse mit Kollegen und externen Experten entgegengewirkt werden.

Als empirisches hypothesengenerierendes Evaluations-Verfahren betrachtet, könnten mit SSR Designs - durch eine schrittweise Erweiterung der Fallbasis - Vergleichsfälle untersucht, Extremfälle gegenübergestellt oder rein *theoretisch* interessante Fälle einer genaueren Evaluation zugeführt werden, die das Handlungssystem Sozialer Arbeit gleichsam von innen beleuchtet und gestaltet. Ob und inwieweit sich die mit SSR untersuchten Ergebnisse auf andere Einzelfälle übertragen lassen (externe Validität), bleibt dennoch diskussionsbedürftig

und bedarf zusätzlicher Anstrengungen. Julius, Schlosser & Goetze (2000, S. 155 ff.) schlagen hier die Metaanalyse als „ein ganzes Bündel von Maßnahmen“ (vor), um die (...) Validität von zusammenfassenden Aussagen in einem interessierenden Forschungsgebiet zu erhöhen.“

Herkömmliche (Gruppen)Evaluierungen können ebenso die Übertragbarkeit analysieren und so die individuellen Einzelfalldarstellungen ergänzen.

Ethische Bedenken

Ein weiterer Kritikpunkt an der SSR liegt darin, dass die forschungsorientierten Designs den Moralkodex der Fachkräfte Sozialer Arbeit verletzen, weil diese ihre Aufmerksamkeit zu sehr auf das Evaluationsverfahren lenken und sich nicht mehr ausschließlich auf den Hilfeprozess konzentrieren könnten.

Jedwede Praxis Sozialer Arbeit basiert auf der Annahme, dass bestimmte Methoden - in sensibler aber systematischer Weise angewandt – problemlösend und zielführend sind. Evaluationsverfahren wie die SSR versuchen sich genau mit diesen Fragestellungen auseinanderzusetzen. Zugespielt formuliert würde es sogar ethisch bedenklich sein, wenn man nicht systematisch überprüft oder - zumindest nach gängiger fachlicher Auffassung - nicht davon ausgehen kann, dass die Interventionen positive Auswirkungen auf Klienten haben. Wenn Evaluationen als nicht hilfreich, sondern sogar als verletzend oder peinlich von Klienten erlebt werden, dann sollten sie auch nicht angewandt werden. Klienten sollten bei der SSR in die Problem- und Zieldefinition - unter Berücksichtigung individueller Wertvorstellungen und Handlungsmöglichkeiten - auch in die Interpretation und Entscheidung über die weitere Verwendung der erhobenen Daten einbezogen werden. Sie müssen die Evaluation jederzeit unterbrechen oder beenden können, wenn sie sich durch die Evaluation verletzt fühlen oder einen Nachteil befürchten.

Damit kann auch der Vorbehalt von Praktikern entkräftet werden, die Bedenken äußern, wenn sie eine offensichtlich wirksame Intervention stoppen müssen, nur weil der gewählte Design dies zu einem bestimmten Zeitpunkt erfordert. Zudem birgt die Rücknahme einer Intervention auch die Chance, frühzeitig eine mögliche – unbeabsichtigte - Interventions-Abhängigkeit des Klienten zu erkennen und dieser entgegen zu wirken.

Weitere ethische Bedenken werden von Fachkräften genannt, wenn ein SSR –Design eine Baseline oder A-Phase vorsieht, da sie sich aus berufsethischen Gründen verpflichtet sehen, bei Hilfebedarf von Personen auch Hilfe anzubieten.

Selbstverständlich sind diese Bedenken zu beachten, könnten aber durch geeignete Versuchspläne z.B. B-A-B umgangen werden.

Künstlichkeit des Evaluationsverfahrens

Evaluation mit SSR-Designs erfordert das Festlegen bestimmter Verfahrensschritte im Interesse eines zielorientierten Problemlösungsprozesses. Vielen Praktikern erscheinen diese Bedingungen als zu starr, zu künstlich. Sie sehen sich aufgrund der experimentellen Designs zu Handlungen, bzw. Interventionen gezwungen, die es ohne Evaluation mit SSR nicht bräuchte. Die Vorbehalte erstrecken sich dabei auf die Notwendigkeit der Datenerhebung über lange Baselines, das Erfordernis der Operationalisierung und Reduzierung komplexer Verhaltensweisen auf möglichst einfach quantifizierbare Variablen, die den Gesamtzusammenhang nicht mehr adäquat abbilden könnten, etc..

Diese Vorbehalte dürften jedoch nicht zutreffen, denn Sozialarbeiter und Klient müssen übereinstimmend der Meinung sein, dass durch die Evaluation des Prozessverlaufs mit SSR im individuellen Kontext ein unmittelbares Feedback auf problemorientierte Interventionen hilfreich für den weiteren Prozessverlauf sein kann. SSR bietet beispielsweise durch einen B-A-B-Design die Möglichkeit zur Evaluation auch dann, wenn eine Hilfeleistung sofort erforderlich ist und keine Zeit bleibt, um eine Baseline zu erfassen.

Im Mittelpunkt der Überlegungen muss auch in der SSR immer die Ausgewogenheit von Kosten und Nutzen für den Klienten stehen. Denn in der SSR geht es um die Beantwortung der Frage, ob die gewählte Intervention bei einem bestimmten Klienten eine Veränderung bewirkt und wenn ja, ob der Unterschied mit den Interventionszielen übereinstimmt.

Dem Vorbehalt der scheinbaren „Künstlichkeit“ des Evaluationsverfahrens kann jedoch durch inhaltliche Auseinandersetzungen mit der spezifischen Methodik der SSR und/oder durch kollegiale oder externe Beratung entgegengewirkt werden.

3.3 Zusammenfassende Einschätzungen

SSR könnte in seiner Begrenzung auf kleine Teilausschnitte für die Soziale Arbeit eine Chance darstellen, die Komplexität des Gegenstandsbereiches in seinen Teilthemen zu erfassen, um sie für den Problemlösungsprozess der Akteure Sozialer Arbeit zu strukturieren und zu systematisieren.

Ihre Stärke liegt in der Beleuchtung der Einzelthemen, indem es die Wirkungen der eingeführten oder abgezogenen Interventionen in den Verhaltensweisen der beobachteten Subjekte in seiner Prozesshaftigkeit begleitend dokumentiert. SSR wendet sich damit an die Praktiker Sozialer Arbeit und will diese durch die Reduktion der Komplexität auf kleine Einheiten in ihrer Entscheidungsfindung unterstützen.

Deshalb könnte überall dort, wo die selbstinitiierte systematische Beobachtung der eigenen Handlungszusammenhänge (oder Teile davon) mit dem Ziel der Feststellung des erreichten oder potentiellen Problemlösungsgrades der untersuchten Handlungselemente als Chance für eine weitere Professionalisierung gesehen wird, der Einsatz der SSR sinnvoll erfolgen. (vgl. Vock, 1999, S 45).

Darüber hinaus ist es grundsätzlich möglich, auch kompliziertere Verhaltenskomplexe mit Hilfe von Skalen und Indizes zu erfassen.

Wenn das Arbeitsfeld – ganz oder in Teilen – mit SSR evaluiert werden soll, erfordert dies eine entsprechende Operationalisierung. Dadurch können zwangsläufig zunächst nur die wesentlichen „Standardsituationen“ in ihrer Breite evaluiert werden.

Allerdings ist hierbei festzuhalten, dass mit zunehmender Komplexität der zu beobachtenden Zusammenhänge bzw. der zu beobachtenden Verhaltenskomplexe, auch der Umfang und der Anspruch an die Erhebungsinstrumente steigen. Entsprechend aufwändig und schwierig gestaltet sich die kontinuierliche Messung des beobachteten Verhaltens und dessen Auswertung anhand von Skalen und Indizes.

Mit zunehmender Komplexität der Operationalisierungen und der Designs wird es zudem immer schwieriger, die daraus resultierenden Ergebnisse angemessen zu interpretieren und sie auf die insgesamt verfolgten Ziele zu beziehen. Eine kollegiale Diskussion z.B. im Arbeitsteam könnte dazu verhelfen, diese Ergebnisse sinnvoll zu interpretieren und sie auf die zu erreichenden Ziele zu beziehen.

Bei der SSR geht es nicht um Grundlagenforschung. Die Auswahl von Problemverhalten im SSR geschieht wegen ihrer sozialen Relevanz – zumindest für das zu beforschende Subjekt - und ist problemorientiert. Es ist dabei immer zu fragen, wie wichtig die anzustrebenden Verhaltensänderungen für das betreffende Individuum, die zugehörige Gruppe und die Gesellschaft sind. (Vgl. Julius, Schlosser & Goetze, 2000, S. 14).

Es wird aber bei der Einschätzung von SSR ebenso zu fragen sein, wie wichtig die verstärkte Evaluationsorientierung Sozialer Arbeit für ihre Akteure, ihre Institutionen und Träger und die Gesellschaft ist. Schließlich ist bei der kritischen Betrachtung von SSR noch zu fragen, welche Möglichkeiten und Alternativen es grundsätzlich gibt, die Wirksamkeit von Interventionen im Zeitverlauf empirisch so zu bestimmen, dass sie in der Praxis der Sozialen Arbeit angewendet werden können.

Praktische Hindernisse für den Einsatz von SSR können jedoch sein, wenn eine unmittelbare Krisenintervention durchzuführen ist, wenn die Arbeitsbelastung von SozialarbeiterInnen zu hoch ist, wenn dieses Verfahren in der eigenen Einrichtung nicht gewürdigt bzw. anerkannt, aber auch, wenn es vom Klienten abgelehnt wird (vgl. Rubin & Babbie, 1997, S. 314).

Resümee

Die SSR ist ein pragmatisches empirisches Verfahren um die Wirkungen professionellen Handelns auf Einzelsysteme im Zeitverlauf zu analysieren. Sie hat eine bestechende Attraktivität: Sie ist relativ einfach und ohne größeren Zeitaufwand durchführbar und auch die (optische) Auswertung kann ohne Spezialkenntnisse vorgenommen werden. Sie bezieht sich unmittelbar auf die interessierenden Interventionen bei den einzelnen Klienten und versucht die Praxis-Wirksamkeit des professionellen Handelns zu bestimmen. Insofern greift sie unmittelbar die Anliegen der Fachkräfte auf, die Wirksamkeit ihrer Arbeit zu analysieren und in der Konsequenz nach effektiveren Interventionensmethoden zu suchen und anzuwenden (vgl. Wüstendörfer, 2005). Sie kann somit dazu beitragen, das Handeln der Akteure in der Sozialen Arbeit zu professionalisieren.

Ernstzunehmenden Kritikpunkte sind jedoch zu beachten: Wie bei allen quantitativ orientierten Verfahren ist zu fragen, ob die Operationalisierungen valide und reliabel sind, in welcher Art und Weise dadurch auf die zugrundeliegenden (komplexen) Zielvariablen geschlossen werden kann und ob und inwieweit die Ergebnisse

verallgemeinerbar sind. Ein schematisierend-ordnendes Evaluationsverfahren wie SSR muss dabei nicht im Widerspruch zur situativen Offenheit methodischen professionellen Handelns stehen. Professionelles Handeln unterliegt einer gewissen „Künstlichkeit“ in der Anwendung spezifischer Methoden. Diese sind zunächst nicht mehr als ein Grundmuster, welches für unterschiedliche Aufgaben unterschiedlich akzentuiert und konkretisiert wird. Damit löst sich der scheinbare Widerspruch auf (vgl. Thiersch, 2000, S. 24)

Wie jedes andere Evaluierungsverfahren beansprucht die SSR jedoch Arbeitszeit, die dann möglicherweise unter dem zunehmenden Kosten- und Erfolgsdruck in der Sozialen Arbeit in der direkten Arbeit mit Klienten fehlt. Dies gilt jedoch gleichermaßen für Fortbildungsmaßnahmen, Qualitätssicherung u.ä. Deshalb sind zunächst grundsätzliche Fragen zu klären, welchen Stellenwert Evaluierung in der praktischen Arbeit haben soll und wieviel Arbeitszeit dafür bereitgestellt werden muss. In Anlehnung an Rubin & Babbie (1997) stellt sich dabei nicht die Frage, wie hoch der Zeitaufwand für die Durchführung des SSR ist sondern vielmehr, ob wir es uns leisten können auf dieses Verfahren zu verzichten.

Insgesamt betrachtet erscheint die SSR als eine gute Möglichkeit, sich mit der Frage auseinanderzusetzen, ob die (pädagogischen) Interventionen bei Klienten etwas bewirken und zielt insbesondere auf den prozessualen Ablauf. Sie könnte dadurch eine gute Ergänzung zu anderen (Selbst-)Evaluierungen bilden, jedoch auch als eigenständiges Verfahren eingesetzt werden.

Literatur

Biermann, Adrienne (2004):

Interventionsforschung im Bereich von Körper- und Geistigbehindertenpädagogik am Beispiel der Kontrollierten Einzelfallforschung. In: Sonderpädagogik, 34.Jg., H. 1, S. 22 - 33.

Bloom, Martin; Fischer, Joel; Orme, John G. (2002):

Evaluating Practice: Guidelines for the Accountable Professional, 4. Aufl., Boston u.a.: Allyn & Bacon.

Braun, Frank (2003):

Konzeption der wissenschaftlichen Begleitung des Modellprogramms „Kompetenzagenturen“. Unveröff. Manuskript. München: Deutsches Jugendinstitut

Braun, Frank; Schaub, Günther (2002):

Wissenschaftliche Begleitung des Modellprogramms „Kompetenzagenturen zur sozialen und beruflichen Integration von Jugendlichen 2002 – 2006“. München: DJI. 01.08.2002

Heiner, Maja (1988): Von der forschungsorientierten zur praxisorientierten Selbstevaluation. Entwurf eines Konzeptes. In: Heiner, Maja: Selbstevaluation in der sozialen Arbeit. Freiburg im Breisgau: Lambertus. S. 7 – 40.

Heiner, Maja (2002):

Evaluation. In: Deutscher Verein für öffentliche und private Fürsorge (Hrsg.): Fachlexikon der sozialen Arbeit. 5. aktual. Auflage. Frankfurt/Main: Eigenverlag. S. 301 - 302.

Hornung, Joachim; Hinkel, Jana (1998):

Single-Case Studies. Eine kleine systematische Übersicht.

http://www.datadiwan.de/netzwerk/index.htm?/evaluation/hr_023d_.htm, 03.12.1998

Julius, Henri; Schlosser, R.W.; Goetze, Herbert (2000):

Kontrollierte Einzelfallstudien. Göttingen: Hogrefe.

Kern, Horst, J. (1997):

Einzelfallforschung. Eine Einführung für Studierende und Praktiker. Weinheim: Psychologie Verlags Union.

Lauth, Gerhard W.; Freese, Stephan 2003:

Effekt einer schulbasierten Behandlung von ADHD in der Bewertung von Lehrern und Eltern – eine Einzelfallstudie an 4 Kindern. In: Sonderpädagogik, 34. Jg. S.

Mühl, H. (2002): Einzelfallstudien zum pädagogischen Umgang mit Verhaltensstörungen bei Menschen mit geistiger Beeinträchtigung. Oldenburg: Didaktisches Zentrum (diz) der Carl von Ossietzky Universität

Petermann, Franz (1989):

Einzelfallanalyse. 2.,völlig überarb. Aufl., München, Wien: Oldenbourg

Rubin, Allen; Babbie, Earl (1997):

Research Methods for Social Work. 3. Aufl., Pacific Grove u. a.: Brooks/Cole Publ. Co.

Spiegel, Hiltrud von (1993):

Aus Erfahrung lernen: Qualifizierung durch Selbstevaluation., Münster: Votum

Spiegel, Hiltrud von 1998:

Arbeitshilfen für das methodische Handeln. In: Heiner Maja; Meinhold, Marianne; Spiegel, Hiltrud von; Staub-Bernasconi, Silvia: Methodisches Handeln in der Sozialen Arbeit. 4. erw. Aufl., Freiburg im Breisgau: Lambertus

Spiegel, Hiltrud von(2001):

Perspektive der Selbstevaluation – veranschaulicht am Beispiel Qualitätsentwicklung in der Kinder- und Jugendhilfe. In: Bundesministerium für Familie, Frauen, Senioren und Jugend (Hrsg.): Materialien zur Qualitätssicherung in der Kinder- und Jugendarbeit „QS 35“. S 85 – 88. Berlin 2001.

Thiersch, H. (2000):

Lebensweltorientierte Soziale Arbeit. Aufgaben der Praxis im sozialen Wandel. 4. Aufl.. Weinheim: Beltz

Vock, Rainer (1999):

Selbstevaluation in Beschäftigungs- und Qualifizierungsprojekten. Teil 1. Theoretische und methodische Grundlagen. In: heidelberger institut beruf und arbeit: hiba-Weiterbildung. Band 20/04. Lübeck: hiba verlag

Vestner, Bruni (2004):

Single Subject Research – ein Forschungsverfahren zur Evaluation der Wirksamkeit von Sozialer Arbeit. Eine Darstellung des Verfahrens und seiner exemplarischen Anwendung im Rahmen des bundesweiten Modellprogramms „Arbeitsweltorientierte Jugendsozialarbeit“ in der Modellphase „Kompetenzagentur“. Unveröff. Diplomarbeit, FB Sozialwesen der G.S.O-FH Nürnberg vom SS 2004.

Wüstendörfer, Werner (2005):

Erprobung der „Single Subject Research“ im Modellprogramm „Kompetenzagenturen“. München/Halle: DJI, Wissenschaftliche Texte 5/2005 (www.dji.de/abt_fsp1)

Yegidis, Bonnie L.; Weinbach, Robert.W. (1996):

Research methods for social workers. 2. Aufl., Needham Heights: Allyn and Bacon

Verf.: Dipl. Sozialpäd. Bruni Vestner, Geschäftsführerin des KJR Nürnberg-Land;

Prof. Dr. Werner Wüstendörfer, Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg, Fachbereich Sozialwesen, Bahnhofstr. 87, 90402 Nürnberg