

5.2.8 Beurteilung und Vorausberechnung von Wirkungsgraden mehrstufiger Verdichter

Ausgehend von der bereits in den Abschn. 5.2.4 und 5.2.6 beschriebenen Problematik der Modellierung der in Verdichtern – vor allem in mehrstufigen – bei kompressibler Strömung auftretenden Profil-, Rand- und Spaltverlusten sowie den Verlusten durch Verdichtungsstöße, bzw. die Problematik der Übertragung der in Gitterwindkanälen ermittelten Verluste auf die Bedingungen in Verdichtern, wird eine gangbare Methode beschrieben, mit der zwei Fragen beantwortet werden können:

- die Kalibrierung der Ansätze zur Berechnung der Verluste in Gittern für die Bedingungen in Verdichtern aufgrund gemessener Verdichterwirkungsgrade und
- die Nutzung der Ergebnisse dieser Kalibrierung für die Vorausberechnung von Verdichterwirkungsgraden bei vorliegenden Auslegungsdaten der Gitter.

Diese Problematik wurde in [5.2.4.1] bereits in den 1970er Jahren behandelt und wird im Folgenden unter Einschluss inzwischen verfügbar gewordener Daten ergänzt und damit aktualisiert. Dabei wird weiterhin von der in Abschn. 5.2.4 beschriebenen Formulierung der Verluste nach Gl. 5.2.4.2

$$\omega = \omega_p + \omega_w + \omega_{\text{Sek}} + \omega_{\text{Sp}}$$

bzw. von der differenzierteren Schreibweise nach Gl. 5.2.4.7

$$\omega = (\omega_{\text{P,ink}}^* + \Delta\omega_{\text{P,ko}} + \omega_w) \left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}^*} \right)^{-0,2} + (\omega_{\text{Sek}}^* + \omega_{\text{Sp}}^*) \left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}^*} \right)^{-\varepsilon} + \omega_{\text{TS,SS}}$$

ausgegangen, wobei $\text{Re}^* = 2,5 \cdot 10^5$ und nach [5.2.4.1] der Exponent ε im Bereich um 0,06 liegt. Dabei ergibt sich der Exponent ε aus der Analyse einer größeren Zahl von Verdichtern bzw. der Relation zwischen $(\omega_p + \omega_w)$ und $(\omega_{\text{Sek}} + \omega_{\text{Sp}})$ in der Weise, dass die bekannte Abhängigkeit der Verdichterwirkungsgrade von der Re-Zahl

$$\text{Re} = \frac{W_1 \cdot l}{v}$$

des 1. Laufgitters, z. B. nach [3.1.1]

$$\frac{1 - \eta_{\text{pol}}}{1 - \eta_{\text{pol}}^*} = \left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}^*} \right)^{-n},$$

mit $n = 0,10 \dots 0,14$ erfüllt ist.

Was die Formulierung der Verlustbeiwerte ω_w , ω_{Sek} und ω_{Sp} betrifft, so stellen diese nach Abschn. 5.2.4 jeweils auf das gesamte Gitter umgelegte Durchschnittswerte dar, die entsprechend der hier behandelten Analyse bzw. Vorausberechnung von Wirkungsgraden auf der Basis einer „Mittelschnittsrechnung“ im Mittelschnitt verwendet werden. Ferner werden die Profilverlustbeiwerte ω_p und die Beiwerte $\omega_{\text{TS/SS}}$ der transsonischen oder supersonischen Verluste, die jeweils in Abhängigkeit vom Radius berechnet werden können, für den Mittelschnitt bestimmt. Bei der im Folgenden dargestellten weiteren Entwicklung der in [5.2.4.1] beschriebenen Methodik wird vor allem auf die transsonischen/supersonischen Verluste bei ND-Verdichtern mit kleinen Eintritts-Nabenverhältnissen, bei denen die „Mittelschnitts-

rechnung“ aufgrund deutlicher 3D-Effekte zu Ungenauigkeiten führen mag, näher eingegangen. Was den in [5.2.4.1] nur pauschal behandelten Einfluss der Seitenwandgrenzschichten auf die Sekundär- und Spaltverluste betrifft, kann nunmehr nach Abschn. 5.2.4 bzw. Bild 5.2.4.15 davon ausgegangen werden, dass die Sekundärverluste im Bereich $\delta_1^*/l > 0,04$ nicht mehr von der Dicke der Seitenwandgrenzschichten abhängen. Dies entspricht bei Schaufel-Steckungsverhältnissen $h/l = 1,0 \dots 2,0$ ($\dots 3,0$) nach Gl. 5.2.4.70/71 Blockagefaktoren

$$B \leq 0,04 \dots 0,08.$$

Im Übrigen werden die Verlustbeiwerte in Übereinstimmung mit [5.2.4.1] auf der Basis von Abschn. 5.2.4 wie folgt behandelt:

- Was die **Profilverluste** nach Gl. 5.2.4.4 und 5.2.4.8...5.2.4.25 betrifft, so ist zu bemerken, dass die inzwischen erfolgte Entwicklung der superkritischen Profile im Unterschallbereich – wie in Abschn. 5.2.4 erwähnt – z. B. nach [5.2.4.8] zwar eine Erweiterung des Anstell- bzw. Arbeitsbereichs bei geringen Verlusten, aber keine nennenswerte Verkleinerung der Verluste im Bestpunkt selbst, der hier angesprochen ist, gebracht hat.
- Die supersonischen Verluste nach Gl. 5.2.4.27...5.2.4.31 werden nach Überprüfung anhand einer größeren Zahl von Messungen an Überschallgittern im Windkanal nach Abschn. 5.2.4 bei $Ma_1 \geq 1$ nach dem gleichen Modell wie in [5.2.4.1] auf Bild 5.2.4.6 dargestellt.
- Die transsonischen Verluste im Bereich $Ma_{\text{krit}} < Ma_1 < 1$ werden entsprechend Gl. 5.2.4.32...5.2.4.40 so bestimmt, dass einerseits die kritische Mach-Zahl nach Gl. 5.2.4.35...5.2.4.38 mit Gl. 5.2.4.11 anhand der Gitterdaten einigermaßen korrekt bestimmt wird und andererseits der kontinuierliche Anschluss an ω_{SS} bei $Ma_1 = 1$ erreicht wird. Darüber hinaus wird der nach Messungen an Gittern und Rotoren – vgl. [5.2.4.28] – bestehende Verlauf von ω_{TS} im Bereich $Ma_{\text{krit}} < Ma_1 < 1$ nach Gl. 5.2.4.39 erreicht.
- Die Verluste durch Seitenwandreibung werden nach Gl. 5.2.4.43,
- die Sekundärverluste nach Gl. 5.2.4.72...5.2.4.74 und
- die Spaltverluste nach Gl. 5.2.4.73...5.2.4.74 berechnet.

Dabei gilt jeweils die Relation ω/c_W nach Gl. 5.2.3.36.

- Die Verluste durch Reibung unter den Innenringen können nach den Gln. 5.2.4.102...5.2.4.105 abgeschätzt und direkt auf den Wirkungsgrad angerechnet werden. Dabei ist zu bedenken, dass der von vielen Parametern abhängige Einfluss des Wiedereintritts der Leckage auf das betreffende Leitgitter im Rahmen der hier verfolgten, einfachen „Mittelschnittsmethodik“ zur Berechnung des Wirkungsgrades nicht erfasst werden kann.

Mit der gegenüber [5.2.4.1] wesentlich erweiterten Datenbasis, die seinerzeit 18 im Zeitraum bis 1975 entwickelte HD-Verdichter umfasste, auf nunmehr insgesamt 32 MD-/HD- und ND-Verdichter, die den Zeitraum bis ca. 2010 umfassen und zugleich einen sichtbar größeren Bereich der Auslegungsdaten, insbesondere der mittleren Anström-Mach-Zahlen (bei fiktiver axialer Zuströmung $C_{u,1} = 0$)

$$\overline{Ma}_{1, fm} = \left(\frac{Ma_{1,1} + Ma_{1,z}}{2} \right)_{fm} \quad (5.2.8.1)$$

bis in den Bereich

$$\overline{Ma}_1 = 0,77 \dots 1,30$$

umfassen, ergibt sich insgesamt folgender Bereich wichtiger Auslegungsparameter:

		ND-Verdichter	MD-/HD-Verdichter
Druckverhältnis	Π	< 5	$4 \dots 12$
Stufenzahl	z	3	$3 \dots 12$
Eintritts-Nabenverhältnis	$\frac{v_1}{h/l}$	$0,3 \dots 0,4$	$0,48 \dots 0,85$
Mittlerer Schlankheitsgrad der Schaufeln bzw.	$\frac{h}{l}$	$1,0 \dots 4,0$	$1,0 \dots 3,0$
mittleres axiales Stufen-Streckungsverhältnis	$(\overline{h/l}_{ax})_{St}$	$0,50 \dots 1,44$	$0,50 \dots 1,60$
reduzierte Umfangsge-schwindigkeit am Eintritt im Flächenmittel	U_{fm}/\sqrt{T}	$16 \dots 20$	$14 \dots 18$
Mittlere Druckziffer im Flächenmittel	$\overline{\psi}_{eff}$	$0,7 \dots 0,9$	$0,61 \dots 1,0$

Die beträchtliche Erweiterung des abgedeckten Mach-Zahl-Bereichs und der Nabenverhältnisse am Eintritt erfordert eine Modifikation der Berechnung der transsonischen/supersonischen Verluste gegenüber Abschn. 5.2.4, Gl. 5.2.4.27...5.2.4.40. Hierzu wird der Ansatz für die Berechnung der supersonischen Verluste nach Gl. 5.2.4.27...5.2.4.31 bzw. Bild 5.2.4.6 durch Ergänzung der für den Schaufelschnitt im Flächenmittel geltenden Formulierung der Saugseiten-Mach-Zahl

$$Ma_{SS, fm} = f(Ma_1 \vartheta_{SS})_{fm}$$

entsprechend dem repräsentativen Wert

$$Ma_{SS, repr} = f(Ma_{1, repr} \vartheta_{SS})_{fm} \quad (5.2.8.2)$$

erweitert. Dabei berücksichtigt

$$Ma_{1, repr} = f(v_1) \cdot Ma_{1, fm}, \quad (5.2.8.3)$$

dass bei Nabenverhältnissen $v_1 < 0,5 \dots 0,6$ die Anström-Mach-Zahl $Ma_{1, fm}$ nicht mehr voll repräsentativ für das gesamte Gitter ist bzw. die Korrektur entsprechend $f(v_1)$ geeignet ist, die Bedingungen entlang der Kanalhöhe genauer wiederzugeben. Dazu ergibt sich aus den o. a. verfügbaren Daten von ND- und MD-/HD-Verdichtern mit der Anström-Mach-Zahl jeweils des 1. und letzten Rotors am Außen- und Innenradius in Relation zur Anström-Mach-Zahl im Flächenmittel nach Bild 5.2.8.1 durch Betrachtung der Mittelwerte am Außen- und Innenradius in Relation zum Flächenmittel unter Vernachlässigung der Streuung durch Integration die Relation

$$\left(\frac{Ma_{repr}}{Ma_{fm}}\right)_1 = \int_{v_1}^1 \left(\frac{Ma}{Ma_{fm}}\right)_1 \cdot \frac{r}{r_a} \cdot d\left(\frac{r}{r_a}\right) \approx \frac{v_1 \left(\frac{Ma_i}{Ma_{fm}}\right)_1 + \sqrt{\frac{1+v_1^2}{2}} + \left(\frac{Ma_a}{Ma_{fm}}\right)_1}{v_1 + \sqrt{\frac{1+v_1^2}{2}} + 1} \quad (5.2.8.4)$$

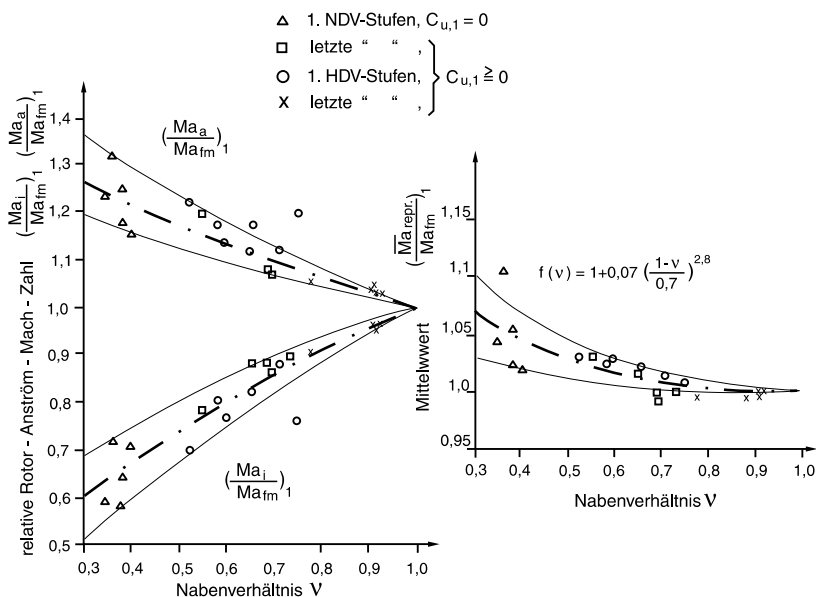


Bild 5.2.8.1 Rotor-Anström-Mach-Zahlen bei HD- und ND-Verdichtern und Mittelwertbildung

bzw.

$$\left(\frac{Ma_{repr}}{Ma_{fm}} \right)_1 = f(v_1) \approx 1 + 0,070 \left(\frac{1 - v_1}{0,70} \right)^{2,8}. \quad (5.2.8.5)$$

Daraus geht hervor, dass die in Bild 5.2.8.1 ebenfalls eingetragene Relation $(Ma_{1,repr}/Ma_{fm})_1$ nur im Bereich $v < 0,7$ sichtbar über 1 liegt.

An sich erscheint es opportun, auch anstelle der supersonischen Umlenkung $\vartheta_{SS,fm}$ einen repräsentativen Ausdruck $\vartheta_{SS,repr}$ analog Gl. 5.2.8.3 zu ermitteln. Mit Rücksicht auf die dabei erwarteten Komplikationen wird darauf jedoch verzichtet.

Damit können die supersonischen Verluste der Gitter analog den Gln. 5.2.4.27...5.2.4.31 entsprechend

$$Ma_{max,S,repr} = f(Ma_{1,repr}, \vartheta_{SS,fm}) \quad (5.2.8.6)$$

$$\overline{Ma}_{SS,repr} = (Ma_1 + Ma_{max,S,repr})^{\frac{1}{2}} \quad (5.2.8.7)$$

$$\hat{p}_{repr}/p_1 = f(\overline{Ma}_{SS,repr}) \quad (5.2.8.8)$$

$$\omega_{SS,repr} = \frac{\Delta p_{repr}}{p_{dyn,1}} = \frac{1 - \hat{p}_{repr}/p_1}{p_{dyn}/p_1} \quad (5.2.8.9 \hat{=} 5.2.4.31)$$

berechnet werden.

Dabei wird angenommen, dass die Höhe der supersonischen Verluste nach Abschn. 5.2.4 bei gleichen Gitterparametern und gleichem Profiltyp – d. h. insbesondere der supersonischen Umlenkung ϑ_{SS} – und gleicher Anström-Mach-Zahl keiner Entwicklung über EIS unterworfen ist.

Ferner werden zur Erläuterung der eingebrachten, gegenüber [5.2.4.1] stark erweiterten Datenbasis mit den Bildern 5.2.8.2...5.2.8.4 die Entwicklungen der Parameter \overline{Ma}_1 , $(\overline{h}/l_{ax})_{St}$ und $\overline{\psi}_{eff}$ über dem Parameter EIS dargestellt.

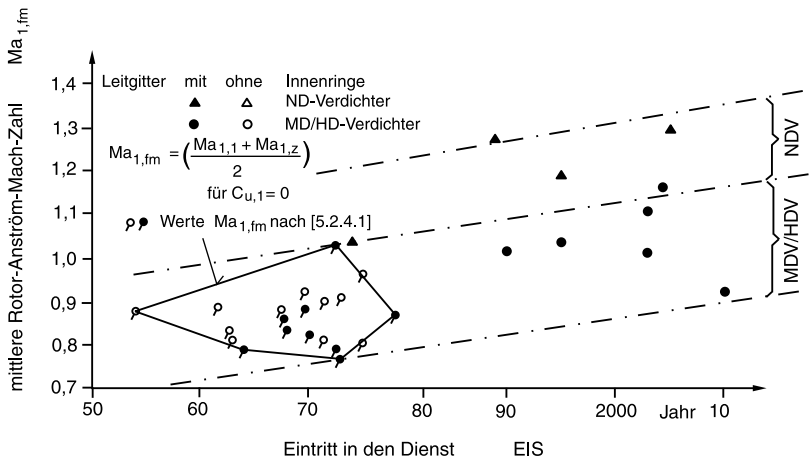


Bild 5.2.8.2 Zeitlicher Trend der mittleren Rotor-Anström-Mach-Zahlen der in die Wirkungsgradanalyse einbezogenen ND- und HD-Verdichter

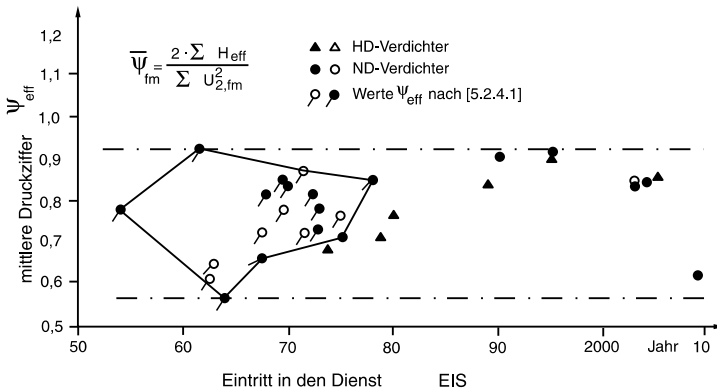


Bild 5.2.8.3 Zeitlicher Trend der aerodynamischen Belastung der in die Wirkungsgradanalyse einbezogenen ND- und MD-/HD-Verdichter

Die Entwicklung der ermittelten Sekundärverlustfaktoren k_{Sek} über EIS nach Bild 5.2.8.5 über den Zeitraum seit 1960 hinweg ist bemerkenswert und repräsentiert die allgemeine Verbesserung der Verdichter-Aerodynamik bzw. -Auslegungsmethodik, die u. a. in der Verkleinerung der Sekundärverluste zum Ausdruck kommt. Zugleich signalisiert Bild 5.2.8.5 bei der Analyse eines Verdichters nach Messungen je nach Lage des festgestellten Verlustfaktors k_{Sec} die Erfolgsaussichten von Aktivitäten bzw. Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades.

Die dabei auftretende Streuung der Werte k_{Sek} erklärt sich hauptsächlich daraus, dass alle bei der Berechnung der Verluste nach Gl. 5.2.4.7 zwischen realen und berechneten Verlustkomponenten auftretenden Abweichungen auf die Sekundärverluste fokussiert werden. Demgegenüber sind die Auswirkungen ersichtlicher Annahme des Radialspiels der Schaufeln relativ gering, da aufgrund des Ansatzes

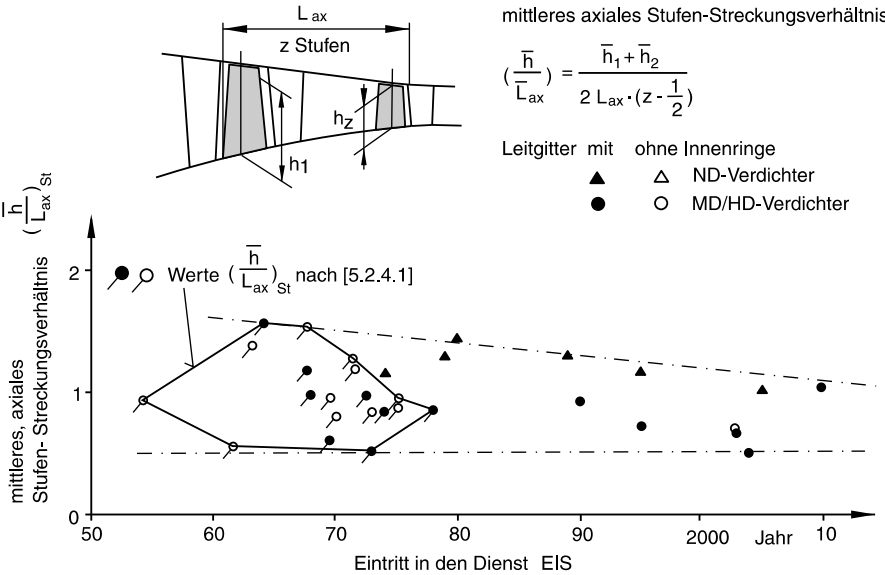


Bild 5.2.8.4 Zeitlicher Trend des mittleren, axialen Stufen-Streckverhältnisses der in die Wirkungsgradanalyse einbezogenen ND- und HD-Verdichter

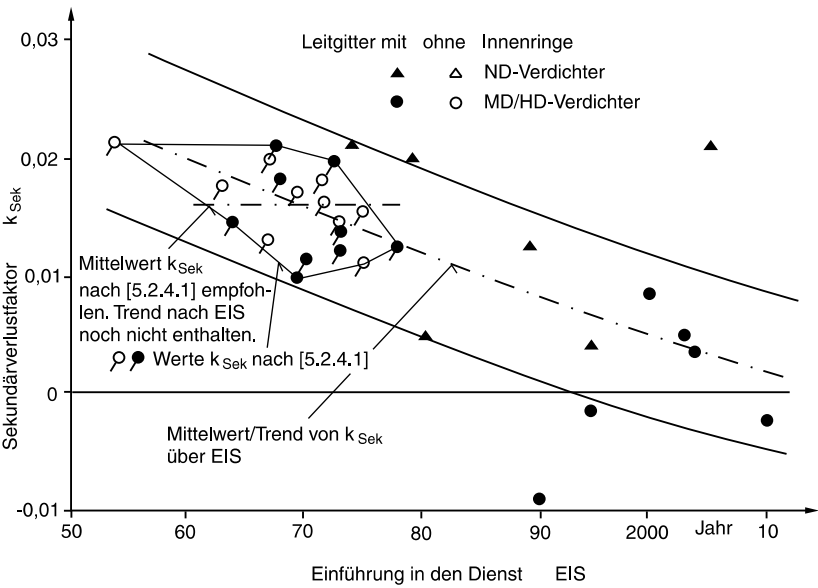


Bild 5.2.8.5 Zeitlicher Trend des Sekundärverlustfaktors k_{Sek} über der Einführung in den Dienst bei ND- und MD-/HD-Verdichtern

für die Sekundär- und Spaltverluste nach Gl. 5.2.4.72/73

$$[k_{\text{Sek}} + k_{\text{Sp}} \cdot (s/h)] \cdot f \quad (\text{Strömungsparameter})$$

die Relation

$$(\Delta k_{\text{Sek}} + k_{\text{Sp}} \cdot \Delta s/h) = \text{const.} \quad (5.2.8.10)$$

bzw. mit

$$s/h = \frac{s}{D_a} \cdot \frac{2}{1-\nu} \quad (5.2.8.11)$$

$$\Delta k_{\text{Sek}} = -\Delta \left(\frac{s}{D_a} \right) \cdot k_{\text{Sp}} \cdot \frac{2}{1-\nu} \quad (5.2.8.12)$$

abgeleitet werden kann. Mit $k_{\text{Sp}} = 0,60$ und Nabenverhältnissen im Bereich $\bar{\nu} = 0,5 \dots 0,85$ ergibt sich

$$\Delta k_{\text{Sek}} = - (2 \dots 12) \Delta(s/D_a), \quad (5.2.8.13)$$

sodass bei Fehlschätzung von s/D_a , die maximal im Bereich $\Delta(s/D_a) = \pm 0,3\%$ liegen kann, der maximale Fehler $\Delta k_{\text{Sek}} = \pm (0,0012 \dots 0,004)$ auftreten mag.

Zur Aktualisierung der in [5.2.4.1] durchgeführten Kontrolle, wonach der Faktor k_{Sek} nach Gl. 5.2.4.73 – abgesehen von der beträchtlichen Streuung der Werte – keinerlei Tendenz gegenüber Korrelationen über den Parametern

$$\bar{\psi}_{\text{eff}}; \quad (\bar{h}/l_{\text{ax}})_{\text{St}}; \quad \bar{M}a_1; \quad \Pi; \quad \bar{h} \quad \text{und} \quad z$$

aufweist, seien mit den Bildern 5.2.8.6...5.2.8.8 die Faktoren k_{Sek} über den Parametern $\bar{M}a_1$, $(\bar{h}/l_{\text{ax}})_{\text{St}}$ und $\bar{\psi}_{\text{eff}}$ dargestellt, wobei wiederum wie erwartet keine Tendenzen festzustellen sind. Damit wird zugleich bestätigt, dass der Ansatz von k_{Sek} und k_{Sp} nach Gl. 5.2.4.72/73, der den Parameter $(h/l_{\text{ax}})_{\text{St}}$ nicht enthält, relevant ist bzw. dass der Wirkungsgrad eines Verdichters von dessen „Länge“ nicht abhängt. Dies erscheint im Hinblick auf die starke Abhängigkeit der Abreißreserve vom Parameter $(h/l_{\text{ax}})_{\text{St}}$ bemerkenswert.

Abschließend gibt Bild 5.2.8.9 den Vergleich der mit Mittelwerten $\bar{k}_{\text{Sek}} = f(\text{EIS})$ nach Bild 5.2.8.5 berechneten und nach Messungen wirklich erreichten Wirkungsgrade η_{pol} .

Im Zusammenhang mit Abschn. 5.3.1, wo u. a. die Berechnung der Wirkungsgrade auf der Basis der Navier-Stokes-Gleichungen behandelt wird, ergibt sich, dass die ebenso wie in Abschn. 5.3.1 teilweise festgestellte Differenz der gemessenen und berechneten Werte in der Größenordnung von 2–3% zugunsten der berechneten liegen kann. Daraus ergibt sich einerseits durch den Vergleich mit den aus statistischen Daten mittels k_{Sek} berechneten Wirkungsgraden ein Ansatzpunkt für die Beurteilung der Ergebnisse nach Navier-Stokes. Andererseits erlaubt später der Vergleich des mit \bar{k}_{Sek} berechneten Wirkungsgrades mit dem aus Messungen ermittelten Wirkungsgrad bzw. des wirklichen k_{Sek} -Wertes dessen Einordnung in den Streubereich der k_{Sek} -Werte und damit die Beurteilung des Entwicklungsstandes bzw. des noch vorhandenen Entwicklungspotentials des Verdichters.

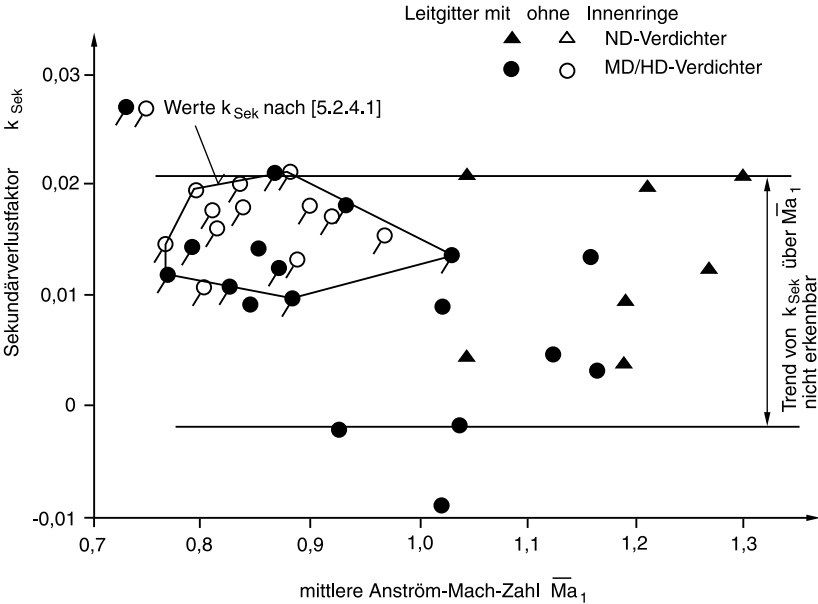


Bild 5.2.8.6 Trend des Sekundärverlustfaktors k_{Sek} über der mittleren Anström-Mach-Zahl bei den in die Analyse einbezogenen ND- und MD-/HD-Verdichtern

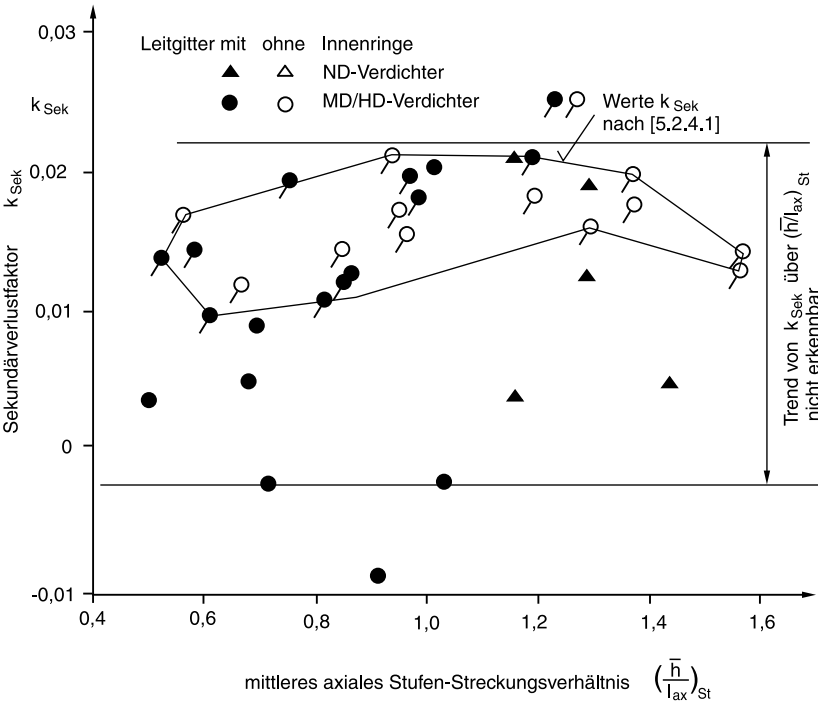


Bild 5.2.8.7 Trend des Sekundärverlustfaktors k_{Sek} über dem mittleren Streckungsverhältnis der Stufen bei den in die Analyse einbezogenen ND- und MD-/HD-Verdichtern

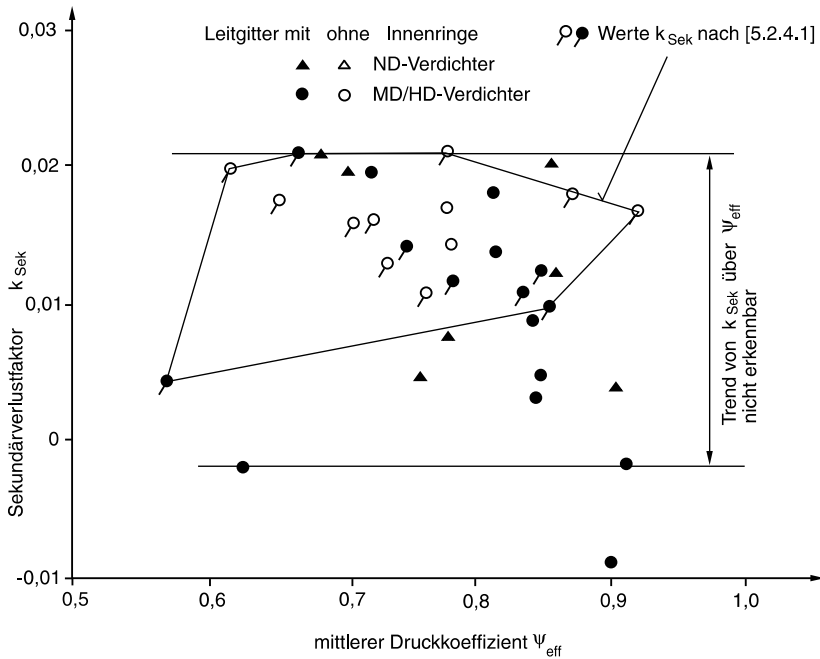


Bild 5.2.8.8 Trend des Sekundärverlustfaktors k_{Sek} über der mittleren Druckziffer ψ_{eff} bei ND- und MD-/HD-Verdichtern

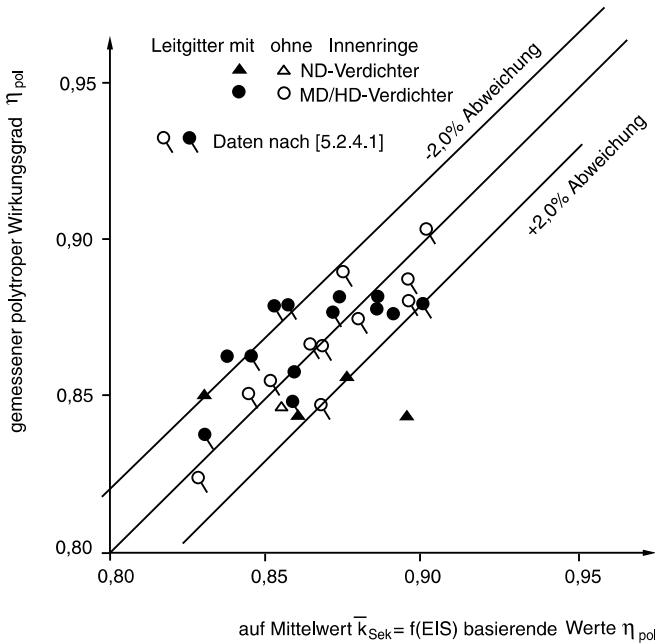


Bild 5.2.8.9 Abweichung der auf $\bar{k}_{\text{Sek}} = f(\text{EIS})$ beruhenden polytropen Wirkungsgrade gegenüber den gemessenen Werten bei ND- und MD-/HD-Verdichtern

Verdichter für Turbo-Flugtriebwerke

Grieb, H.

2009, XV, 696 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-34373-8